



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Ensayos WST de probetas de rocas salinas a distintas velocidades de carga

Treball realitzat per:

Eduardo Cámara Zapata

Dirigit per:

Ignacio Carol Vilarasau

Tutor extern:

Joaquín Liaudat

Màster en:

Enginyeria del Terreny

Barcelona, 28 de junio de 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Resumen

La estabilidad de las excavaciones subterráneas es esencial para mantener las condiciones de seguridad en las tareas que se desarrollan en su interior. En el caso de las minas de potasa, los fenómenos de fluencia (*creep*) y fractura juegan un papel clave en el comportamiento de las galerías. Aparte de la pérdida de gálibo, la convergencia continua en el tiempo provoca otros problemas como son la caída de techos y paramentos, a veces sin previo aviso, constituyendo un serio problema de seguridad y mantenimiento de infraestructura.

Las rocas salinas tienen un marcado comportamiento viscoelástico, presentando fenómenos de fluencia y relajación de tensiones. Cuando sometemos probetas de estas rocas a cargas cercanas a rotura observamos el desarrollo de fracturas que se propagan hasta la falla total de la muestra. Hay muy pocos estudios en la literatura sobre los parámetros de fractura de rocas salinas, y menos aún considerando la dependencia del tiempo. Por este motivo el presente Trabajo Fin de Máster tiene por objeto la caracterización mecánica de las rocas salinas sometidas a fractura mediante un ensayo no convencional conocido como Wedge Splitting Test (WST). Con este ensayo es posible estudiar cómo se desarrollan estas fracturas de forma controlada, para distintas velocidades de abertura.

La obtención y preparación de las muestras aptas para los ensayos ha sido una tarea ardua debido a la naturaleza soluble de estas rocas que impide el uso de agua para refrigerar las herramientas de corte. El TFM incluye una descripción de los diversos métodos utilizados para obtener las muestras y una reseña de la eficacia obtenida de cada uno de ellos.

Previamente a la realización de los ensayos se ha realizado una simulación numérica de los ensayos mediante un programa de elementos finitos (FEM) con el objetivo de optimizar la configuración de los dispositivos y protocolos de ensayo. Estas simulaciones también permitieron hacer una estimación de los resultados que se obtendrían en los ensayos experimentales en base a las hipótesis iniciales sobre el comportamiento combinado de fluencia y fractura.

No se tiene constancia de la existencia previa de ensayos WST sobre rocas salinas por lo que este trabajo constituye un aporte original del autor. Se han obtenido datos experimentales de energía de fractura aparente en Modo I para la halita y silvinita y su variación respecto la velocidad de abertura impuesta. Los resultados parecen indicar que cuanto más baja es la velocidad de abertura impuesta mayor es el trabajo necesario para fracturar la roca pero, en cambio, la fuerza máxima necesaria para partir la probeta es cada vez menor.

Se espera que el trabajo realizado sirva para un mejor conocimiento y predicción del comportamiento de las galerías excavadas en rocas salinas, contribuyendo de esta forma en dar una mayor seguridad a las operaciones que se desarrollan durante la explotación de estos recursos.

Abstract

The stability of underground excavations is crucial to maintain the workplace safety conditions within them. In the case of potash mines, creep effects and rock fracturing play a key role in the behaviour/stability of the mine galleries. In addition to reducing the cross section of the stopes, the progressive convergence of the surrounding saline rock can cause other problems, such as falling roofs and walls, sometimes abruptly without previous symptoms, constituting a serious safety issue and an increase in the drift maintenance cost.

Saline rocks have a marked visco-elastic behavior, showing creep and stress relaxation effects. When specimens of these type of rock are loaded to loads close to the peak strength, fractures start to propagate until the total failure of the sample. There are very few studies in the literature regarding the fracture parameters of saline rocks, and even less considering time dependence of these parameters. For this reason, the present Master Thesis aims at characterizing the fracture behavior of salt rocks by means of an unconventional test known as Wedge Splitting Test (WST). With this test, it is possible to study how these fractures are developed in a controlled environment and for different crack opening velocities.

The process of obtaining and preparing the samples for the test has been a difficult task due to the soluble nature of saline rocks, which does not allow the use of water to cool the cutting tools. The thesis includes a description of the different methods used, as well as a discussion on the efficiency of each of them.

Previously to carrying out the experimental tests, numerical simulations were performed using a Finite Element code, in order to optimize the configuration of the testing devices and the experimental protocols. These simulations also allowed us to make an estimation of the results to be obtained with experiments based on the initial assumptions regarding the combined development of creep and fracture.

To the best of the author's knowledge, there is no previous study using WST to characterize salt rocks. In this sense, this thesis constitutes an original contribution of the author. Experimental data of apparent fracture energy Mode I have been obtained for halite and silvinit and their variation with respect to the prescribed crack opening velocity has been evaluated. The results seem to indicate that the lower the opening speed, the greater is the mechanical work needed to propagate a crack in a saline rock.

It is expected that this study will contribute to a better understanding of the behaviour of underground galleries excavated in salt rocks, with a subsequent improvement of the work safety conditions in this type of mines.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecerles al director de este trabajo Dr. Ignacio Carol y al tutor externo Dr. Joaquín Liaudat todo el tiempo que me han dedicado, corrigiéndome errores, aclarándome dudas y sugiriéndome mejoras. Su paciencia y apoyo han sido fundamentales para poder hacer este trabajo.

Agradecer también al Dr. Daniel Garolera su ayuda con los modelos numéricos utilizados, y a Ariadna Martínez por su colaboración en la preparación de muestras y realización de ensayos.

También agradecer a las empresas y personas de fuera de la Universidad que sin su ayuda y colaboración este trabajo no habría sido posible. Especialmente quiero agradecer a Félix Teixidor de la empresa Salinera de Cardona, SL y a Sara Rabeya de la empresa ICL todas las facilidades que me han brindado para la obtención de muestras. Igualmente agradecer a Albert Sánchez de la empresa ICL por compartir su experiencia sobre el comportamiento de las galerías de minas de potasa.

A todos ellos mis más sinceras gracias.

Índice

1	Introducción.....	3
1.1	Presentación.....	3
1.2	Motivación.....	4
1.3	Objetivos y metodología.....	6
1.4	Organización del contenido.....	7
2	Conceptos mecánicos	11
2.1	Viscoelasticidad lineal y modelos reológicos.....	11
2.2	Concepto de fluencia	13
2.3	Mecánica de fractura	14
3	Propiedades de las rocas salinas	19
3.1	Contexto geológico.....	19
3.2	Halita y silvinita	24
3.2.1	Estructura cristalina. Tamaño de grano	24
3.2.2	Mecanismos de deformación y fractura.....	27
3.2.3	Parámetros resistentes.....	31
3.2.4	Parámetros elásticos.	33
3.2.5	Parámetros reológicos.....	35
3.2.6	Tenacidad de fractura	37
3.2.7	Parámetros resistentes de rocas de la Cuenca Potásica Catalana.	39
3.3	Inestabilidades de galerías por fluencia.....	41
4	Metodología experimental.....	47
4.1	Ensayo Wedge Splitting Test (WST)	47
4.1.1	Principio de funcionamiento.....	48
4.1.2	Geometría de las muestras	54
4.1.3	Obtención de las muestras	55
4.1.4	Preparación de las muestras.....	76
4.1.5	Equipos empleados	81
4.1.6	Ejecución del ensayo	86
4.2	Ensayos de fluencia (<i>creep</i>).....	88
4.2.1	Ley potencial	88
4.2.2	Equipos	91
4.2.3	Muestras	92

4.3	Ensayo de compresión simple	93
4.3.1	Descripción y equipos	93
4.3.2	Muestras	93
5	Modelización numérica previa	95
5.1	Descripción del modelo	95
5.2	Propiedades de los materiales.....	96
5.2.1	Parámetros constitutivos del medio continuo.....	96
5.2.2	Parámetros constitutivos de los elementos junta	98
5.3	Condiciones de contorno	99
5.4	Resultados obtenidos y discusión.....	99
6	Resultados experimentales obtenidos.....	103
6.1	Plan de ensayos.....	103
6.1.1	Ensayos WST	103
6.1.2	Ensayos de fluencia (<i>creep</i>).....	106
6.1.3	Módulo elástico instantáneo	108
6.2	Ensayo WST	108
6.2.1	Halita	108
6.2.2	Silvinita.....	114
6.3	Ensayos de fluencia (<i>creep</i>).....	118
6.3.1	Deformación elástica instantánea:	118
6.3.2	Halita	118
6.3.3	Silvinita.....	120
6.4	Ensayo de compresión simple	121
6.5	Discusión e interpretación de resultados.	124
6.5.1	WST.....	124
6.5.2	Posibles causas de dispersiones de resultados.....	128
6.5.3	Ensayos de fluencia.	131
7	Conclusiones.....	133
8	Referencias	137
9	Anexo I. Ensayos preliminares.....	141
10	Anexo II. Ensayos WST descartados	143
11	Anexo III. Fotografías de los ensayos WST.....	145

1 Introducción

En este apartado se hace una presentación general de este Trabajo Fin de Máster (TFM), se expone la motivación que ha llevado a su realización, así como los objetivos perseguidos, la metodología utilizada y la organización del contenido.

1.1 Presentación

Este TFM consiste en una serie de ensayos experimentales para caracterizar el desarrollo de fracturas en modo I en rocas salinas. En particular, el estudio se centra en el efecto de la velocidad en la que se aplica la carga (o se impone un desplazamiento relativo) en el proceso de fractura, teniendo en consideración el carácter visco-elástico de las rocas salinas.

El presente TFM se desarrolla dentro del Grupo de Investigación de Mecánica de Materiales (MECMAT) de la UPC dirigido por el Prof. Ignacio Carol. El grupo cuenta con una extensa experiencia previa en modelación constitutiva de geomateriales como en la realización de ensayos de mecánicos de caracterización de los mismos. En particular, en los últimos años se han desarrollado una serie de estudios basados en la realización de WSTs [1], [2] que es el método experimental que mayormente se utilizó para el desarrollo de este TFM, tal como se explica más adelante en la Sección 1.3.

Todas las muestras empleadas en este trabajo se han extraído del yacimiento de la cuenca potásica catalana, concretamente de las poblaciones de Cardona y Súria, donde se desarrolla una intensa actividad minera de explotación de estos recursos naturales.

1.2 Motivación

La estabilidad de las excavaciones subterráneas es esencial para mantener las condiciones de seguridad en las tareas que se desarrollan en su interior.

Cuando se crea una cavidad subterránea las tensiones naturales del terreno se ven modificadas y se redistribuyen alrededor del hueco creado. Si la roca circundante es capaz de soportar esta redistribución de tensiones se alcanza un estado de equilibrio y el hueco puede considerarse estable.

Ahora bien, en el caso de las rocas salinas, esta redistribución y concentración de tensiones provoca la aparición de fluencia (*creep*) o deformación diferida en el tiempo bajo carga constante. La fluencia afecta en cómo se redistribuyen las tensiones, rebajándose las tensiones desviadoras en las zonas con mayor fluencia, transfiriéndolas (si ello es estáticamente posible) a zonas con menor fluencia. A pesar de que éste es un fenómeno presente en todo tipo de rocas, desde un punto de vista ingenieril, la fluencia es especialmente importante en el estudio de la resistencia y comportamiento tenso-deformacional de las evaporitas en general y de las rocas salinas en particular.

La deformación diferida en el tiempo se traduce en un cierre o convergencia de los paramentos de las galerías excavadas en sal o potasa. Dependiendo de la carga litoestática, esta velocidad será más o menos importante. Se han observado valores de hasta 1 mm/día en galerías de donde se han extraído muestras para el presente trabajo.

Aparte de la pérdida de gálibo, la convergencia continua en el tiempo provoca otros problemas como son la caída de techos y paramentos, a veces sin previo aviso, constituyendo un serio problema de seguridad y mantenimiento de infraestructura.

Cuando se excava una galería y se activa el mecanismo de fluencia, los paramentos convergen y se deforman hacia el interior del hueco creado. Esta deformación provoca el despegue o separación de las capas que contienen lechos arcillosos, independizando volúmenes potencialmente inestables.

La Figura 1 ofrece un modelo conceptual sencillo de separación de estratos, flexión y rotura del techo de una galería excavada en sal asimilándolo a una viga bi-empotrada, [3]. Como puede verse, en el estrato que forma el techo inestable de la galería se forman fracturas a través de la capa de sal. Este simple modelo conceptual sirve para poner de relieve la importancia que tienen los fenómenos de fractura en la estabilidad de techos y caídas de bloques.

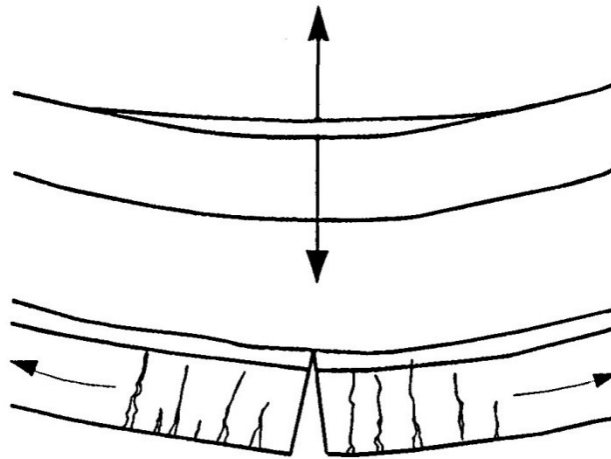


Figura 1. Modelo de separación, flexión y rotura de una “viga” de sal [3].

La casuística en la aparición de bloques inestables es muy extensa, pero puede afirmarse que los fenómenos de fractura y fluencia están detrás de la mayoría de todos ellos. En relación con la deformación diferida en el tiempo existen con más o menos amplitud trabajos referidos a este y otros yacimientos que estudian el fenómeno [4] -[9]. En cambio, la información disponible sobre energía de fractura en rocas salinas es escasísima y poco estudiada [10] -[12] y en ningún caso obtenida mediante ensayos WST. Esta es la principal motivación para realizar este trabajo: poder profundizar de manera experimental en la relación existente entre fluencia y el desarrollo de fracturas en rocas salinas.

Otra motivación es comprobar si el modelo numérico disponible que ya se ha utilizado con éxito para simular ensayos de fluencia en hormigón [13], es capaz de reproducir para rocas salinas la variación en la fuerza de splitting F_{sp} y la energía de fractura cuando cambiamos la velocidad en el modelo.

Los resultados experimentales obtenidos han de servir para la mejora de futuros modelos numéricos que ayuden a predecir el comportamiento de las galerías y por tanto contribuyan en aumentar la seguridad de los trabajos que se desarrollen en su interior.

1.3 Objetivos y metodología

El objetivo general de este trabajo es caracterizar de forma experimental la propagación de fracturas en rocas salinas en función del tiempo transcurrido. Más explícitamente este objetivo es:

a) Realizar ensayos de fractura en modo I con distintas velocidades de carga para caracterizar la relación entre parámetros de fractura y velocidad de carga en rocas salinas.

Para alcanzar esta meta se han fijado unos objetivos secundarios tendientes a alcanzar el objetivo principal. Más explícitamente estos objetivos secundarios son:

b) Ensayar diferentes sistemas de extracción de muestras, establecer ventajas e inconvenientes entre ellos y describir que equipos son necesarios.

c) Obtención de los parámetros de un modelo reológico de cadena de Maxwell de la roca salina en estudio para ser utilizados en un modelo numérico.

d) Obtención de valores de resistencia a compresión simple y del módulo de deformación inicial.

e) Realizar un modelo numérico previo de los ensayos de fractura para hacer una estimación de los resultados a obtener en los ensayos experimentales en base a las hipótesis iniciales sobre el comportamiento combinado de fluencia y fractura.

La metodología para realizar los ensayos de fractura en modo I a distintas velocidades de carga se ha basado en la realización de ensayos WST a diferentes velocidades de subida del plato de carga y el empleo de cuñas con distinto ángulo. Esta variación de la velocidad de ensayo permite estudiar la relación entre los fenómenos de fluencia y la energía necesaria para crear fracturas al poner de manifiesto cómo cambian la energía de fractura y la fuerza máxima de separación en función de la velocidad aplicada.

Respecto las diversas opciones para la extracción de muestras, se han probado diversos sistemas lo que ha permitido valorar los pros y contras de cada uno de ellos.

Respecto el objetivo de la obtención de los parámetros de un modelo reológico de cadena de Maxwell, parámetros indispensables para poder modelizar numéricamente el comportamiento viscoelástico del continuo, se han realizado varios ensayos de fluencia aplicando las cargas constantes en un banco edométrico, obteniendo las curvas tensión-deformación diferida a las que se ajusta una curva de tipo exponencial. Para caracterizar mejor la roca salina estudiada, también se ha realizado un ensayo de resistencia a compresión simple con la obtención del módulo tangente inicial.

Para el último objetivo fijado, modelar numéricamente los ensayos de fractura en modo I a distintas velocidades, se ha empleado un código de elementos finitos (FEM), DRAC desarrollado por el grupo de investigación MECMAT (UPC) [14]. Este código se ha utilizado con éxito en distintas oportunidades para simular el comportamiento mecánico de distintos materiales cuasi-frágiles, tales como rocas y hormigón, e.g. [1], [2], [13] [36] [38].

1.4 Organización del contenido.

Este trabajo consta de siete capítulos principales con el siguiente orden de aparición:

- *Introducción.* En este apartado se hace una presentación general de este Trabajo Fin de Máster (TFM), se expone la motivación que ha llevado a su realización y la problemática que representa para la seguridad el desprendimiento de bloques de techo en las minas de potasa y su relación con los fenómenos de fluencia y fractura, aspectos ambos sobre los que se centra el presente estudio trabajo.

- *Conceptos mecánicos.* Se hace una breve introducción de varios conceptos mecánicos que aparecerán en el desarrollo posterior del trabajo.
- *Propiedades de las rocas salinas.* Se sitúa el contexto geológico de donde provienen las muestras, la naturaleza policristalina de la roca y la influencia que tendrá en la dispersión de resultados el gran tamaño de grano en relación con el tamaño de las muestras empleadas. Finalmente se da una recopilación de parámetros resistentes de las rocas salinas provenientes de otros trabajos.
- *Metodología experimental.* Se explican las principales características del ensayo WST y su principio de funcionamiento, el tipo de muestras necesario, su obtención y preparación previa así como que tipo de resultados obtenemos de este ensayo. Se discute acerca de cómo influye en la energía específica de fractura la geometría de una muestra de un material que presenta deformación significativa por fluencia, definiéndose el concepto de energía aparente de fractura.
- *Modelización numérica.* Previo a la ejecución de los ensayos, se ha realizado una modelización numérica mediante elementos finitos (FEM), con código DRAC [14], para hacer una estimación de los resultados a obtener en los ensayos experimentales en base a las hipótesis iniciales sobre el comportamiento combinado de fluencia y fractura.
- *Resultados experimentales.* Es el cuerpo central de este trabajo. En primer lugar se expone el plan de ensayos, con la elección de las velocidades de ejecución de los ensayos WST, así como el número de muestras disponibles. También la duración de los ensayos de fluencia y la tensión aplicada a cada uno de ellos. A continuación se exponen los resultados obtenidos de los diversos ensayos. Se obtienen datos de energía específica de fractura y fuerza máxima de splitting para la halita y la silvinita, así como la variación de estos parámetros en función de la velocidad de ensayo, al interactuar los fenómenos de fluencia y fractura. También se exponen los parámetros ajustados de las curvas de fluencia a una expresión de tipo potencial y finalmente se da el valor de módulo elástico

“instantáneo” obtenido en ensayo de compresión simple. Se hace una discusión e interpretación de los resultados.

- *Conclusiones.* Se enumeran las principales conclusiones obtenidas, las limitaciones del estudio realizado, y se indican posibles mejoras o futuras líneas de investigación.

2 Conceptos mecánicos

En este apartado se introducen brevemente varios conceptos mecánicos que aparecerán posteriormente durante en el desarrollo del presente TFM.

2.1 Viscoelasticidad lineal y modelos reológicos.

Un material viscoelástico posee simultáneamente propiedades elásticas (deformación instantánea) y viscosas (deformación que depende del tiempo).

El desarrollo de la teoría matemática de la viscoelasticidad lineal está basado en los principios de (1) linealidad y (2) superposición. La linealidad (1) implica que si conocemos la respuesta (p.e. deformación) en cualquier instante a causa de una historia concreta de acciones (p.e. tensiones), si aplicamos otra historia de acciones similar a la anterior pero que difiera en sus valores solamente por un factor, la respuesta obtenida resultará directamente proporcional al valor de dicho factor. Así, por ejemplo, si aplicamos un valor de tensión a un cuerpo y luego lo mantenemos constante (ensayo de fluencia), si repetimos el ensayo aplicando el doble de tensión, obtendremos una curva de deformación que será también el doble a la anterior en cada momento [15]. Por su parte, el principio de superposición (2) consiste en suponer que si conocemos la respuestas del material al aplicar unas ciertas historias de acciones "A" y "B" por separado, la respuesta al aplicar la historia de acciones combinada "A+B", será igual a la suma de dichas respuestas.

La denominada "formulación integral" de la viscoelasticidad, que históricamente se desarrolló primero, se basaba en ecuaciones integrales con la peculiaridad que la respuesta del material dependía no solo del estado actual de tensiones y deformaciones sino, de toda la historia previa de su desarrollo. Computacionalmente esto resultaba poco conveniente pues con el avance del cálculo en los sucesivos escalones de tiempo se generan necesidades de memoria crecientes de magnitud no acotada. Este inconveniente desaparece en las formulaciones basadas en "modelos reológicos", en los que las ecuaciones integrales se ven substituidas por ecuaciones diferenciales, y las necesidades de almacenamiento se reducen a un número acotado de "variables de historia" del modelo, que hay que poner al día en cada nuevo intervalo de tiempo.

Los modelos reológicos para un material viscoelástico frente a tensiones o deformaciones aplicadas consisten en la combinación en serie o paralelo de dispositivos mecánicos tipo muelle y amortiguador.

Los dos modelos más simples que resultan de la unión de un muelle con un amortiguador son el modelo de Maxwell (muelle y amortiguador en serie) y el modelo de Kelvin-Voigt (muelle y amortiguador en paralelo), Figura 2.

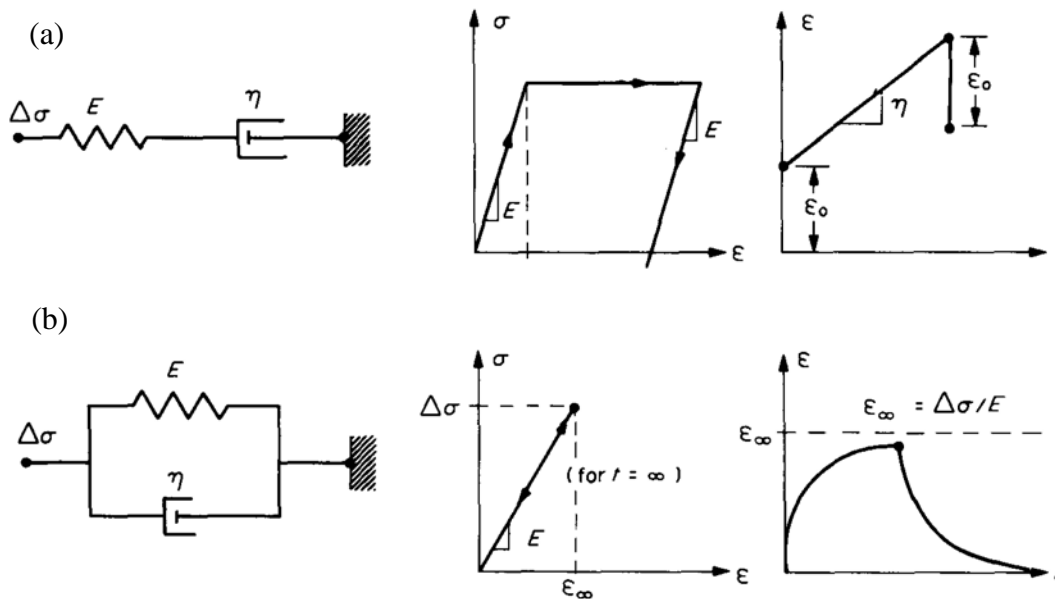


Figura 2. Modelos reológicos simples. (a) comportamiento de un material viscoelástico tipo Maxwell, (b) comportamiento de un material viscoelástico tipo Kelvin-Voigt. [16].

Cada uno de estos modelos tiene sus limitaciones. El modelo de Maxwell reproduce bien la deformación elástica instantánea cuando aplicamos una carga constante, pero la fluencia viscosa es lineal a medida que aumenta el tiempo. En cambio, el modelo de Kelvin no es capaz de reproducir la deformación elástica instantánea inicial pero su curva de fluencia tipo exponencial se ajusta mejor a la realidad.

Combinando estos elementos básicos entre ellos en serie o en paralelo podemos obtenemos diversos modelos reológicos que reproducen más ajustadamente la respuesta de un material viscoelástico frente a tensiones o deformaciones. El modelo utilizado en

el presente TFM se corresponde a una “Cadena de Maxwell”, formado por varios elementos de Maxwell conectados en paralelo, Figura 3.

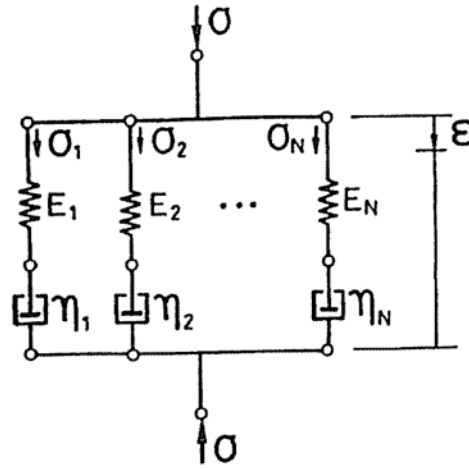


Figura 3. Modelo de cadena de Maxwell [13].

Este modelo viscoelástico presenta una gran ventaja en el análisis numérico, dado que por una parte, añadiendo suficientes elementos a la cadena, es capaz de reproducir con cierta fidelidad comportamientos de fluencia lineal con espectros de respuesta de la amplitud deseada. Y al mismo tiempo, al ser un modelo reológico no es necesario almacenar toda la historia de tensión o deformación en cada punto de integración, ahorrando por tanto mucho coste computacional [13].

2.2 Concepto de fluencia

La fluencia es una deformación a lo largo del tiempo bajo una carga constante. Las rocas salinas responden a las cargas constantes aplicadas con deformación elástica y viscosa.

En el diagrama de deformación por fluencia se pueden distinguir tres fases distintas, como se muestra en la Figura 4, que representa la respuesta tiempo-deformación de una roca salina sometida a deformación por fluencia debido a una carga constante sostenida en el tiempo. Al aplicar una fuerza constante en el material, se induce una deformación instantánea elástica ε_e . La deformación elástica está seguida por una deformación primaria o transitoria, mostrada como Región I en la Figura 4. La Región II,

caracterizada por una pendiente casi constante en el diagrama, corresponde a la fluencia secundaria o en estado estacionario. La fluencia acelerada o terciaria conduce a la rotura como se muestra en la Región III del diagrama. La retirada de la carga aplicada en el punto P de la Región I, provoca que la deformación caiga rápidamente al nivel Q y a partir de entonces tienda asintóticamente a cero en el punto R. La distancia PQ es igual a la deformación elástica ϵ_e . Si la retirada de carga tiene lugar en el punto T de la región secundaria de fluencia, se observa una deformación permanente, VO.

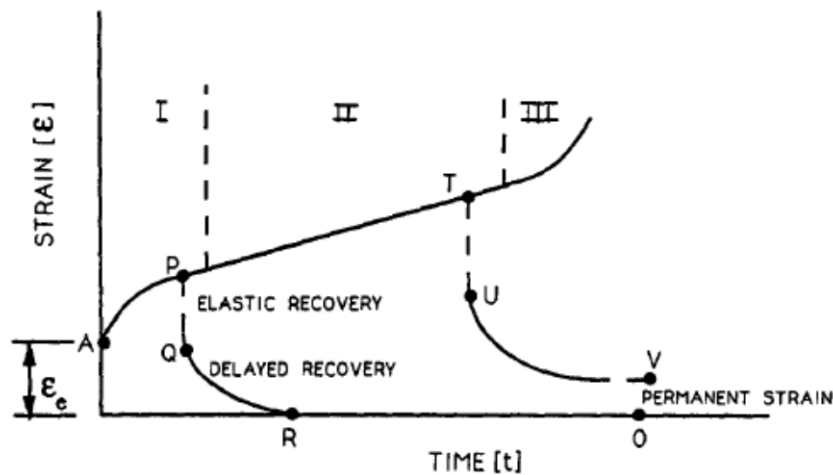


Figura 4. Curva de fluencia tiempo-deformación de una roca salina sometida a carga constante [3].

2.3 Mecánica de fractura

La “Mecánica de Fractura” es la parte de la mecánica de sólidos que estudia y trata de establecer matemáticamente las leyes físicas que gobiernan el inicio y la propagación de las fisuras (fracturas) en los materiales.

Las teorías inicialmente desarrolladas para la mecánica de fractura (antes de 1960) se basan en la hipótesis de que el material continuo en que se desarrollan las fracturas es elástico y lineal, son las denominadas teorías *LEFM* (*Linear Elastic Fracture Mechanics*). A partir de 1960 se desarrollan teorías de mecánica de fractura que tienen en cuenta varios tipos de comportamiento no lineal del material entre fisuras, son las teorías *NLFM* (*non-linear fracture mechanics*).

La *LEFM* puede abordarse desde dos enfoques alternativos: uno energético y el otro mediante el factor de intensidad de tensiones.

a) Enfoque energético.

El enfoque energético se basa en el principio general que la creación de una nueva unidad de área de fisura requiere el consumo de una cantidad de energía pre-establecida por el valor G_f =energía de fractura, que es un parámetro resistente característico de cada material. El aporte de la energía para la propagación de la fractura debe proceder de la descarga elástica del material alrededor de la fractura, que inevitablemente se produce al propagarse ésta. Partiendo de trabajos previos de Griffith, en 1956 Irwin define la tasa de liberación de energía, G , para una estructura concreta constituida de material elástico lineal, y una longitud de fisura determinada, como la tasa de cambio de la energía elástica potencial, por unidad adicional de longitud de la fractura. Obviamente G depende del nivel tensional; si $G < G_f$, la fisura no se propagará, pero en el momento que las tensiones alcancen el nivel tal que $G = G_f$, la fisura se propagará.

Para una grieta de longitud $2a$ situada en una placa de dimensiones infinitas sometida a tensión, Figura 5, la tasa de liberación de energía es:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.1)$$

donde E es el módulo de Young, σ es la tensión aplicada, y a es la mitad de la longitud de la grieta. Como se ha dicho, en el momento de fractura $G = G_f$ y la ecuación 2.1 describe las combinaciones críticas de tensión y tamaño de grieta que conducen a la falla:

$$G_f = \frac{\pi \sigma_f^2 a_c}{E} \quad (2.2)$$

Observar que para un valor constante de G_f , la tensión para fractura σ_f , varía en relación con $1/\sqrt{a}$. La tasa de liberación de energía G juega el papel de "fuerza motriz" (o, más apropiadamente "fuerza termodinámica") para la creación de fractura, mientras que G_f juega el papel de "resistencia" del material a la propagación de la fractura.

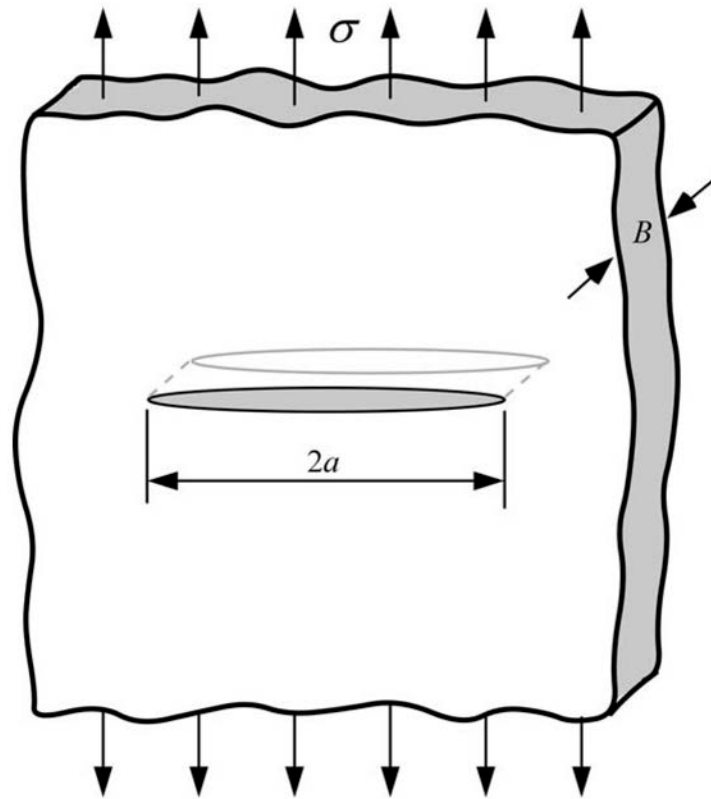


Figura 5. Grieta pasante en una placa infinita sometida a tensión. En la práctica, "infinita" significa que el valor de la anchura de la placa es $\gg 2a$ [17].

b) Enfoque mediante el factor de intensidad de tensiones.

La Figura 6 muestra esquemáticamente un elemento cercano a la punta de una grieta en un material elástico, junto con las tensiones en el plano de ese elemento. Notar que cada componente de las tensiones es proporcional a una sola constante K_I . Si se conoce esta constante, es posible calcular toda la distribución de tensiones en la punta de la grieta con las ecuaciones de la Figura 6. Esta constante, llamada factor de intensidad de tensiones, caracteriza completamente las condiciones de la punta de la grieta en un material elástico lineal. Si suponemos que un material falla localmente con una combinación crítica de tensiones y deformaciones, entonces se desprende que la

fractura debe ocurrir con una intensidad de tensiones crítica K_{IC} . Así pues, K_{IC} es una medida alternativa de “resistencia” del material, que generalmente se denomina Tenacidad de Fractura (o *Fracture Toughness*).

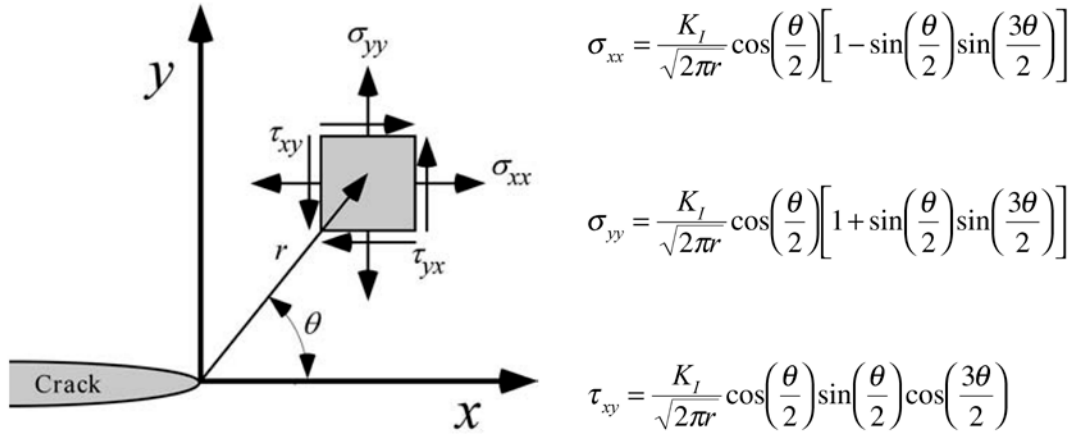


Figura 6. Tensiones en un punto con coordenadas polares (r, θ) cercano a la punta de una grieta en una material elástico [17].

Para la placa de la Figura 5, el factor de intensidad de tensiones está dado por:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

El fallo ocurre cuando $K_I = K_{IC}$. En este caso, K_I es la fuerza motriz de la fractura y K_{IC} es una medida de la resistencia del material. Comparando la ecuación 2.1 con la 2.3, obtenemos la relación entre K_I y G :

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (2.4)$$

Esta misma relación se obtiene para G_f y K_{IC} . Así purés, el enfoque energético y de intensidad de tensiones en mecánica de fractura son equivalentes para materiales elásticos lineales.

Dependiendo del estado tensional y de los desplazamientos de la superficie de la grieta, tenemos tres modos de obertura de grieta, llamados Modo I, II y III, Figura 7, cada uno con su factor de intensidad de tensiones K_I , K_{II} , K_{III} . El Modo I es el de mayor interés técnico y en él se centra el presente TFM.

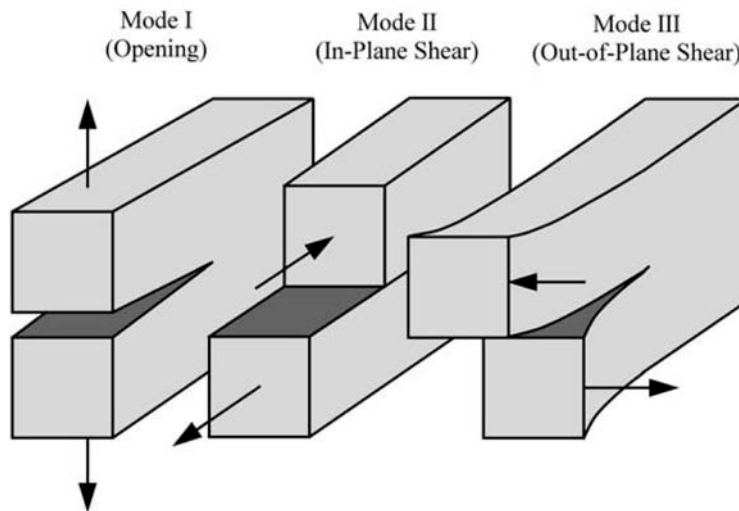


Figura 7. Tres modos de carga que se pueden aplicar a una fractura [17].

Las ecuaciones de la Figura 6 muestran que todas las componentes de las tensiones son teóricamente infinitas en la punta de la grieta, en $r=0$. Dado que las tensiones deben tener un valor finito en cualquier problema real, debe existir una zona alrededor de la punta de la grieta en la cual ocurran procesos no lineales, tales como plastificación o microfracturación, que limiten la intensidad del campo de tensiones. El tamaño de esta zona, conocida como Zona de Proceso de Fractura (*Fracture Process Zone, FPZ*) es el factor crucial para evaluar la aplicabilidad de *LEFM*. Si el tamaño es grande en comparación con la longitud de la grieta o con cualquier otra dimensión característica del dominio, el problema no tiene solución lineal y el concepto de factor de intensidad de tensiones deja de tener sentido. En cambio, el concepto de energía de fractura tiene un carácter más universal, y la mayoría de las teorías de *NLFM* (fractura no lineal) incorporan la G_f (además de otros parámetros adicionales).

3 Propiedades de las rocas salinas

Se expone en este apartado una caracterización general de las propiedades y formación de las rocas salinas estudiadas en este trabajo.

3.1 Contexto geológico

El yacimiento salino de Cuenca Potásica Catalana se formó entre el Eoceno Superior y el Oligoceno al aislarse la comunicación oceánica provocada por el levantamiento de los Pirineos y producirse la desecación de la lengua marina que entrando por el actual golfo de Vizcaya ocupaba el actual valle del Ebro, Figura 8. Esta restricción de la cuenca dio lugar a la sedimentación de una potente serie evaporítica marina, la Fm. Cardona.

En la Figura 9 se muestra la columna litológica del yacimiento en Súrria.

La columna estratigráfica “tipo” puede resumirse de la siguiente manera:

- 6-8 m Techo Carnalita
- 0,9 m (Capa B). Bancos de situación con intercalaciones finas de sal.
- 2,6 m (Sal entredós). Bancos delgados de sal común, con lechos finos de margas.
- 3,4 m (Capa A). Bancos de silvinita alternando con otros de sal.
- 100 a 500 m. (Sal de muro o sal vieja). Potente masa de sal común.
- 12 m Anhidrita basal.

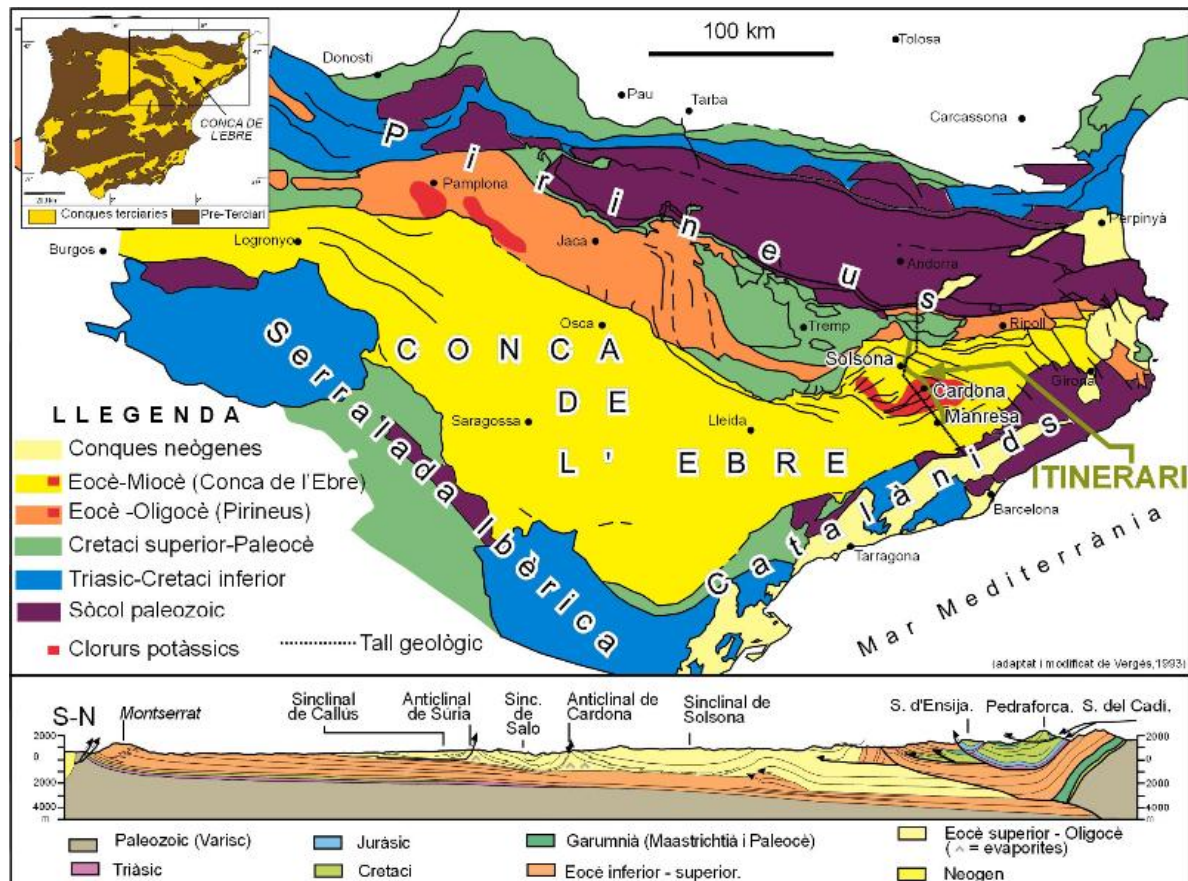


Figura 8. Mapa de la cuenca del Ebro donde se ha indicado la ubicación de los yacimientos de potasa existentes, [18].

Las sales potásicas se explotan desde principios del siglo pasado en las poblaciones de Sallent, Balsareny y Súrria. En Cardona actualmente se explota la halita mediante el sistema de cámaras y pilares.

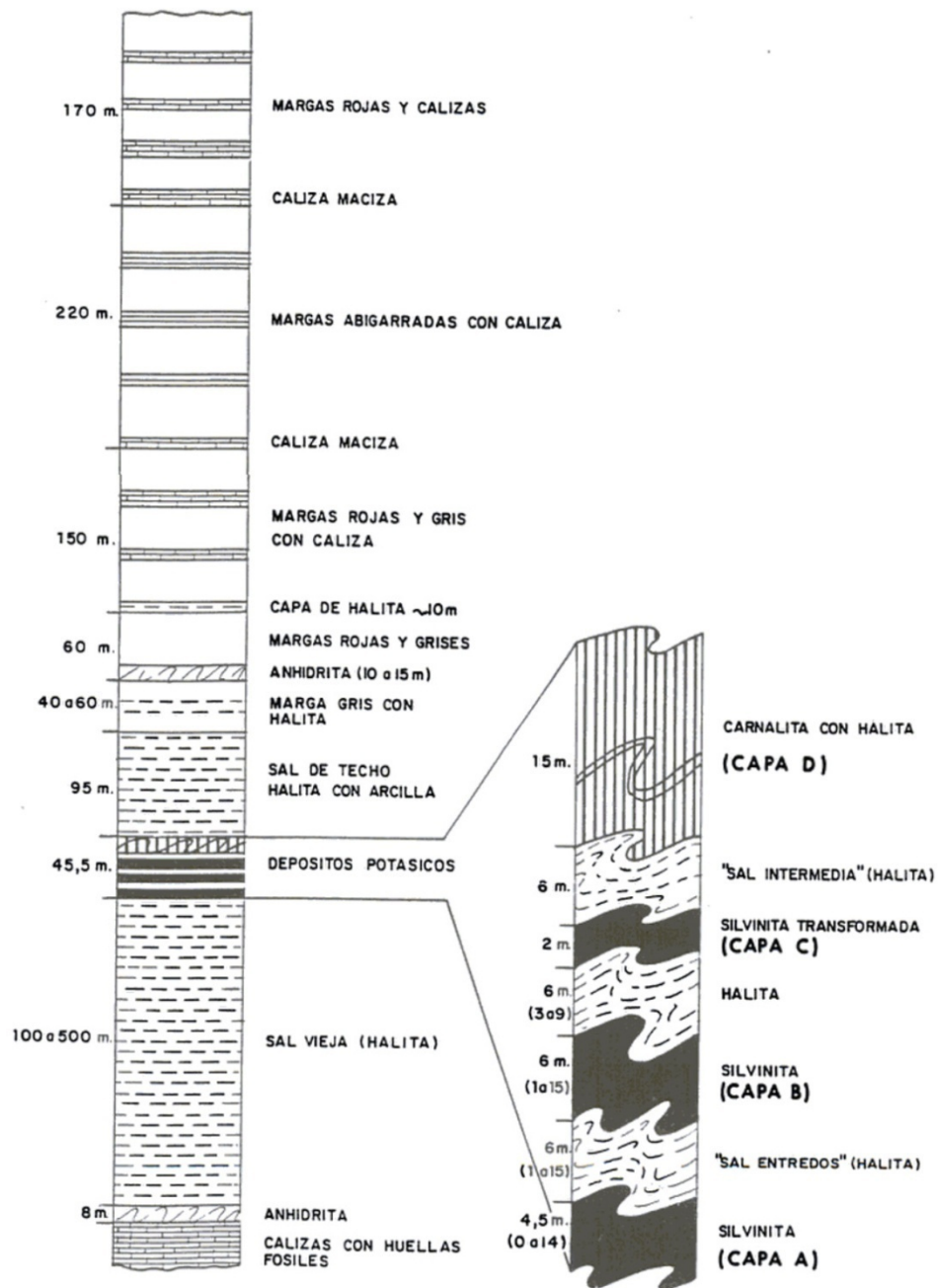


Figura 9. Columna litológica del yacimiento potásico de Súrta, [16].

Las capas de sal y potasa no presentan un espesor y buzamiento constante, sino que debido a los movimientos halocinéticos y su plasticidad, presentan una gran variabilidad de estos factores, Figura 10, donde puede observarse la complejidad de los pliegues y sus distintos órdenes de magnitud. La Figura 11 muestra los diferentes frentes de avances en un sector concreto de la explotación. Sin duda sería de gran interés disponer de una clasificación o categorización de los mecanismos principales que generan caídas

de bloques en función de la gran variabilidad de las condiciones geológicas, pero no se dispone de esta información.

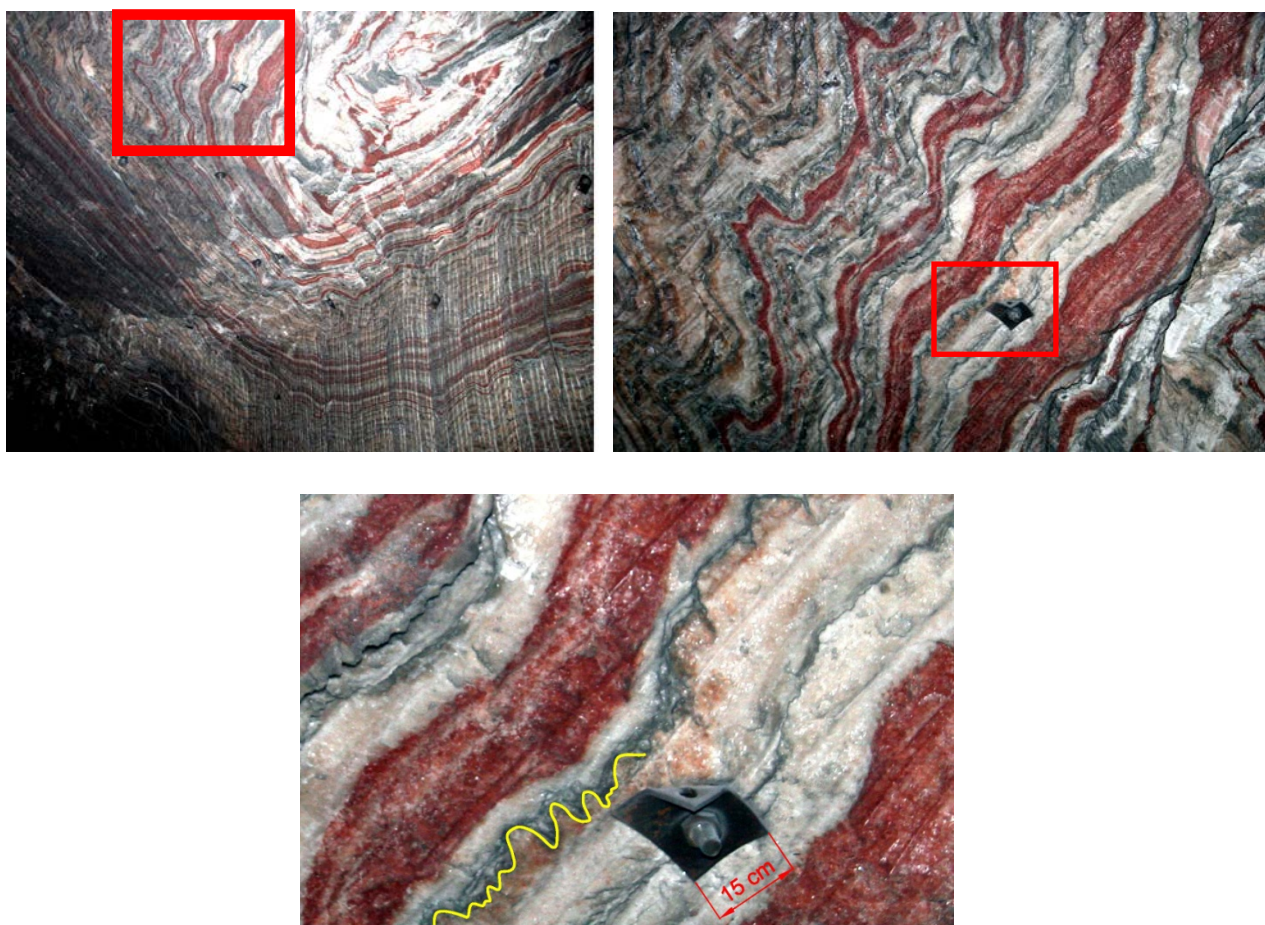


Figura 10. Pliegues desde orden decamétrico a centimétrico.

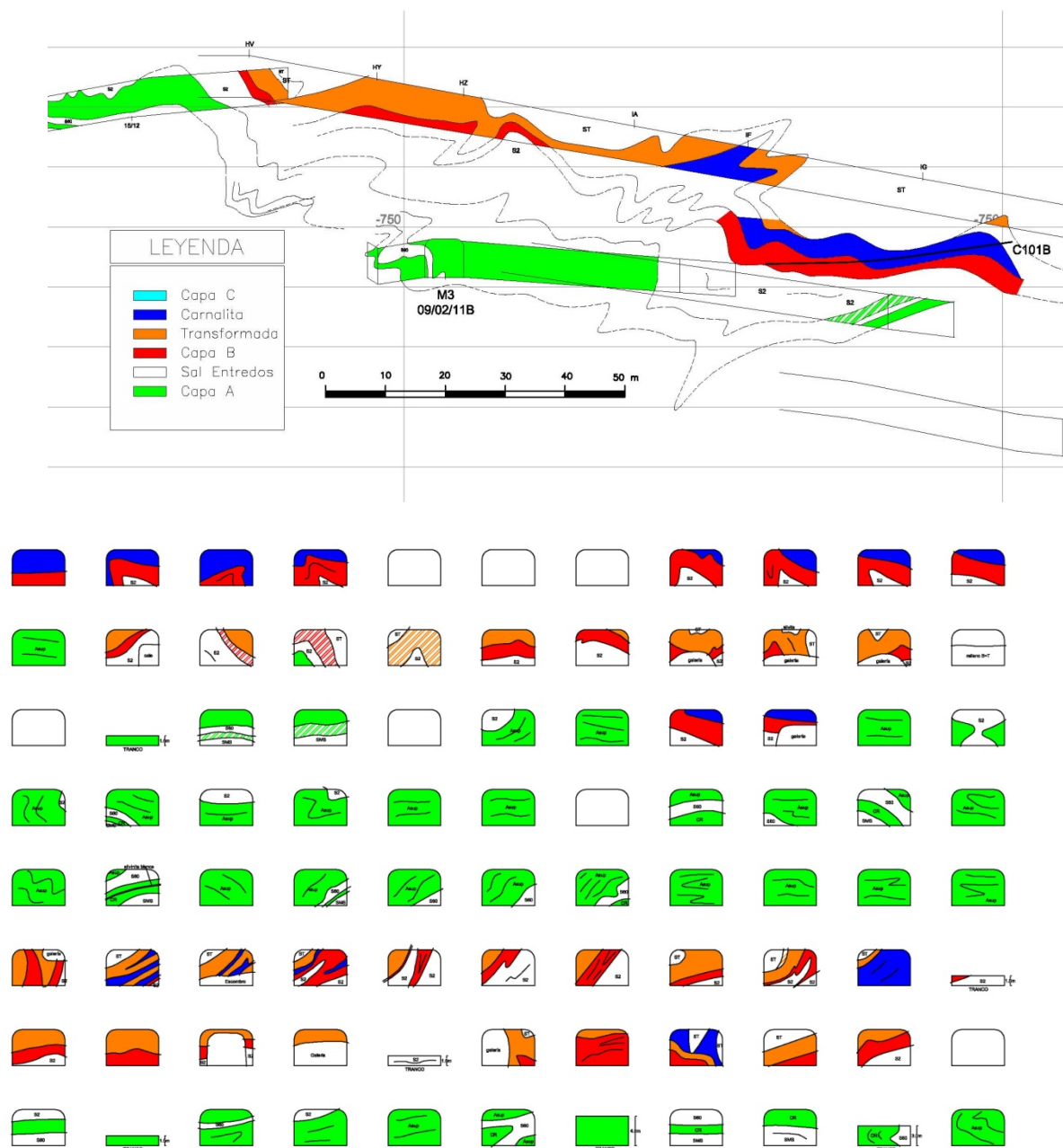


Figura 11. Secciones longitudinales y transversales de frentes de explotación.

3.2 Halita y silvinita

La halita, también conocida como sal de roca o sal gema, es una roca de origen sedimentario producida por la precipitación del cloruro sódico en una disolución saturada de este compuesto. A parte de este mineral también puede presentar impurezas de arcillas, óxidos, etc. que le dan diversas coloraciones: anaranjada, roja, gris, etc. En estado puro es transparente.

La silvinita, cloruro potásico, tiene idéntico origen que la halita, presentando similar estructura y petrofábrica. Posee mayor solubilidad que la halita, hallándose intercalada con ella en el yacimiento de donde provienen las muestras para este trabajo.

3.2.1 Estructura cristalina. Tamaño de grano

La halita es una roca policristalina consistente en granos de NaCl, con un diámetro entre 0,01 mm y varios dm, que puede contener impurezas en forma de solución sólida, minerales secundarios y vapores y fluidos atrapados en inclusiones, contornos de grano o en poros [20] En la Figura 12 se representa conceptualmente un conjunto de granos individuales conectados por sus contornos formando una estructura policristalina y monomineral

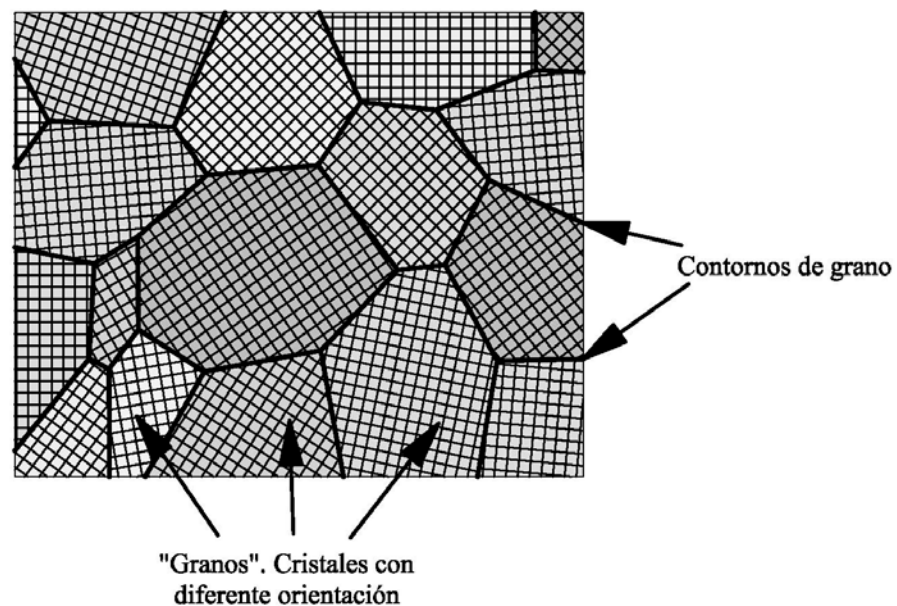


Figura 12. Estructura policristalina de la halita

En [21] se estudia la microestructura de muestras de sal de la mina Asse II (Alemania), observando el rango de tamaños, la morfología de los cristales y las inclusiones de salmuera. De este trabajo se ha extraído la Figura 13, donde puede observarse un ejemplo de estructura policristalina de la halita junto con inclusiones de fluido en los bordes de grano.

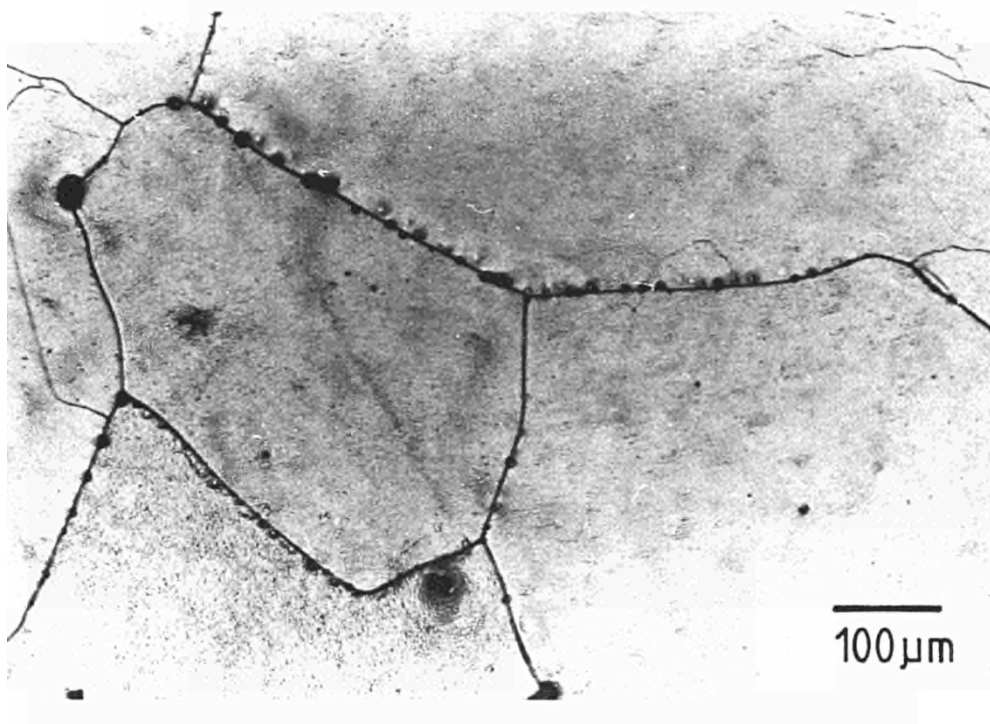


Figura 13. Estructura policristalina de la halita con inclusiones de fluido en los contorno de grano [21].

El tamaño de los granos que forma la roca tiene influencia en el comportamiento mecánico de la sal. En ensayos de compactación por fluencia realizados por [22] con NaCl molturado de grado analítico con tamaños de partícula de 98, 196 y 275 μm y en presencia de salmuera saturada, muestran como la disminución del tamaño de grano comportan un incremento en la deformación por fluencia, Figura 14 .

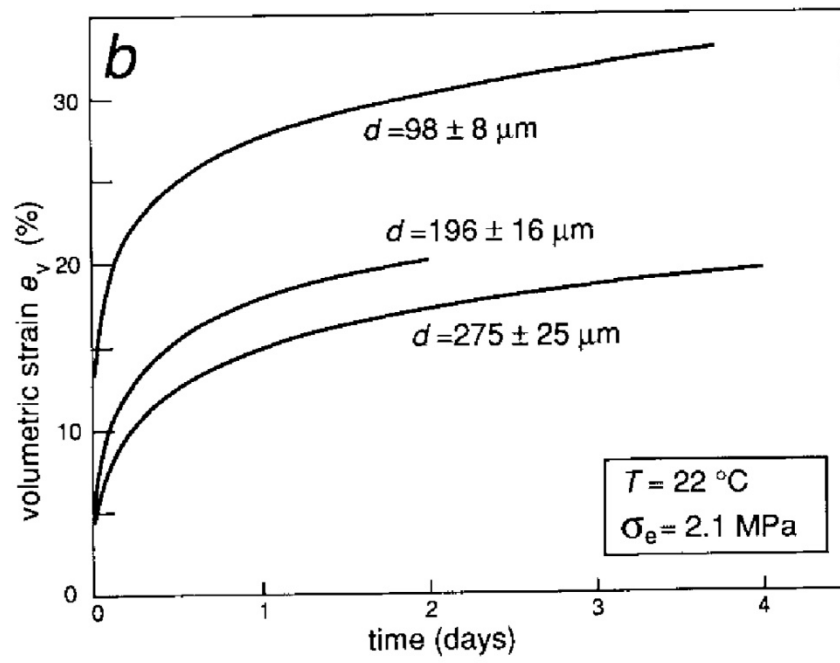


Figura 14. Influencia del tamaño de grano en las curvas de compactación por fluencia de muestras saturadas en salmuera [22].

3.2.2 Mecanismos de deformación y fractura

A diferencia de otras rocas, la halita y silvinita muestran deformación por fluencia a temperatura en condiciones estándar [23]. En [20] se hace una exposición de los distintos mecanismos de deformación en función del estado tensional, el tamaño de grano y el rango de temperaturas habituales en condiciones ingenieriles y de halocinesis natural, entre 20 - 200° C. Estos mecanismos se resumen en la en la Figura 15.

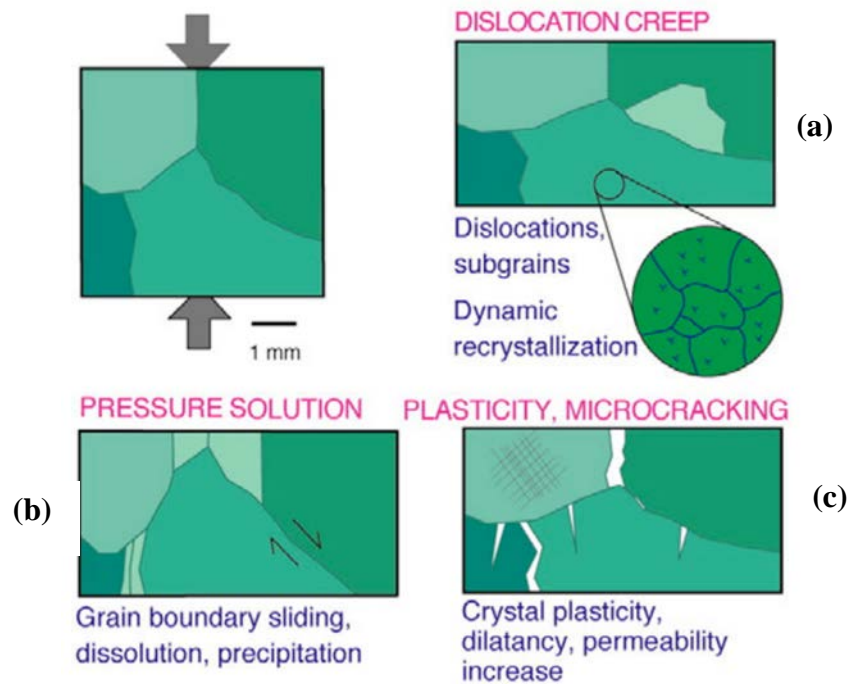


Figura 15. Esquema de los procesos microestructurales que pueden actuar durante la deformación de la halita a temperaturas en el rango 20-200°C. Los diferentes sombreados verdes representan cristales con diferente orientación [20].

Los mecanismos que se describen son:

- Fluencia por dislocación: los procesos ocurren en el interior de la red cristalina de los granos de halita. Los cristales pueden tener grandes deformaciones por este mecanismo. Durante este proceso se forman subgranos de un diámetro que está correlacionado con la tensión desviadora. Si los cristales contienen salmuera en forma de inclusiones o existe una fina película en los contornos del grano, se produce una migración del contorno de grano asistida por fluido, siendo este un proceso eficiente de reducción de la densidad de dislocaciones y por lo tanto de eliminación de la energía

almacenada por las dislocaciones, incluso a temperatura ambiente. La “fuerza” motora de este proceso de recristalización y migración de los contornos de grano es debida a las diferencias de potencial químico existentes entre contornos de grano más antiguos y deformados con gran densidad de dislocaciones y los nuevos granos en crecimiento con pocas dislocaciones, Figura 16.

- b) Fluencia por disolución bajo presión: Mientras que los procesos de fluencia por dislocación tienen lugar en la estructura cristalina de los granos de halita, la fluencia por disolución-precipitación o “disolución por presión” es un proceso que ocurre en los contornos de grano sometidos a esfuerzos. En los contornos con altas concentraciones de tensiones y pequeñas cantidades de salmuera se produce una disolución del grano en los contornos con alta concentración de tensiones, acompañada de la difusión del material a través del fluido del contorno de grano y cristalizando en las interfaces con tensiones normales bajas, Figura 17.
- c) Fluencia por microfracturación y plasticidad de los cristales: se produce con presiones de confinamiento bajas y tensiones desviadoras altas, formándose microgrietas inter y transgranulares (cataclasis), rotación y deslizamientos entre granos, junto con la deformación plástica de los cristales, observándose dilatación.

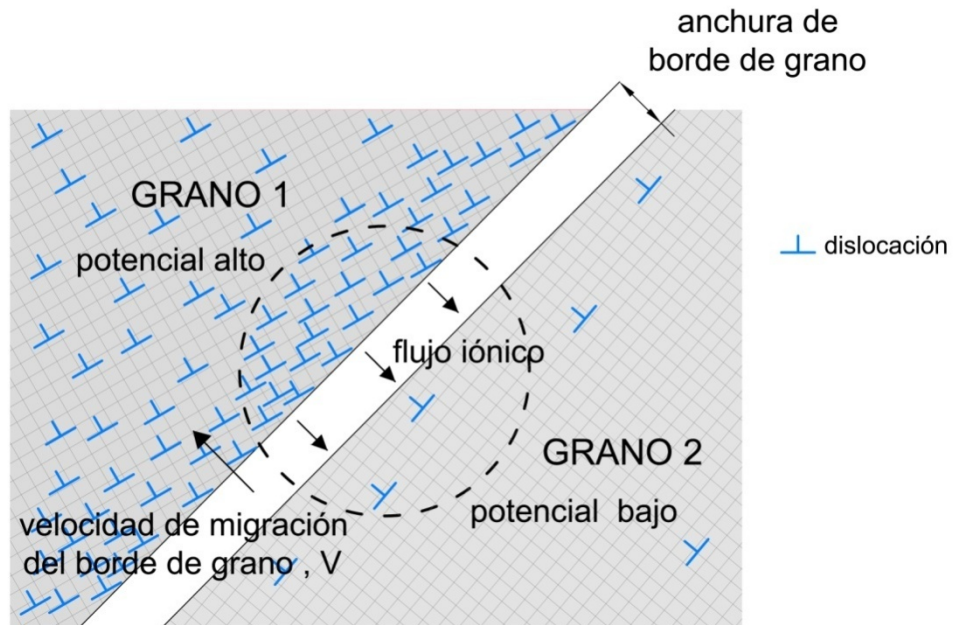


Figura 16. Diagrama ilustrativo del principio de migración de contorno de grano por transferencia de disolución-precipitación a través de contornos de grano rellenos de fluido. Adaptado de [20].

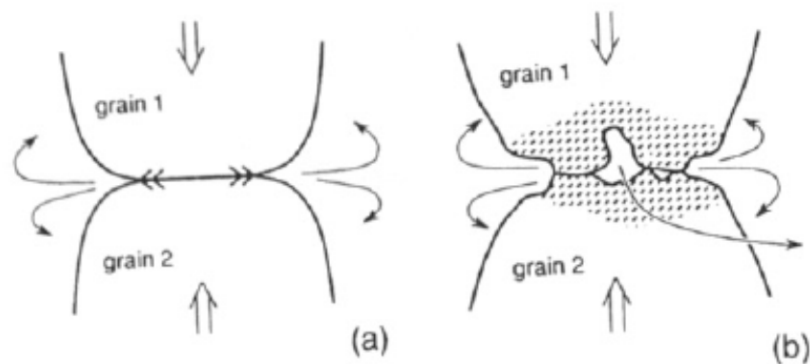


Figura 17. Mecanismo de fluencia por disolución-precipitación sin plasticidad de los cristales, (a) mediante una capa delgada de fluido relleno el contorno de grano, y (b) combinación entre fluencia por disolución-precipitación y plasticidad de los cristales [20].

La importancia relativa de cada proceso depende de variables como la temperatura, presión de confinamiento, tamaño de grano, disolución sólida de impurezas y contenido de una segunda fase, y, muy importante, de la presencia de suficiente agua-salmuera en los contornos de grano. La presencia de estos fluidos tiene gran importancia en la activación de los mecanismos de deformación por disolución-precipitación (*Fluid-assisted diffusional transfer deformation, FADT*), [21], [23]. A pesar de que la halita natural puede aparentar estar “seca”, [24] concluye que el creep por FADT puede ocurrir en rocas salinas naturales sin salmuera añadida.

Como ayuda para la interpretación de la fluencia secundaria sobre una base micromecánica, existen mapas de mecanismos de deformaciones de fluencia estacionaria, Figura 18. Estos mapas reflejan los mecanismos de deformación dominantes bajo diferentes condiciones de presión y temperatura [23], [25].

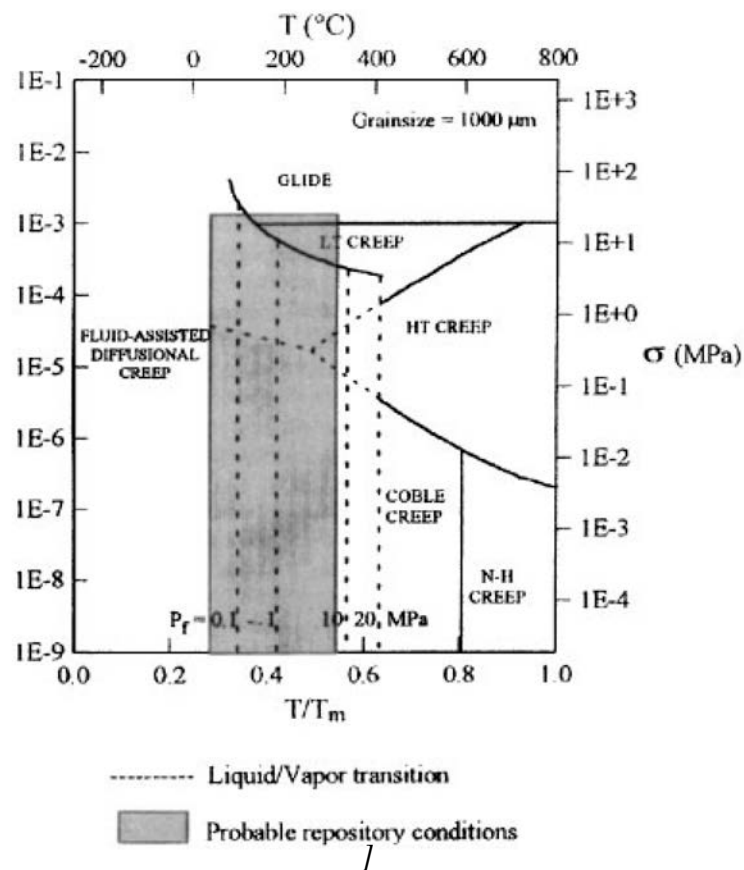


Figura 18. Mapa de de mecanismos de deformación de la sal a distintas presiones y temperaturas [23].

Otro aspecto que puede influir notablemente en la velocidad de fluencia estacionaria es el contenido en humedad de la muestra. [25] reporta que el contenido de humedad puede cambiar la velocidad de fluencia estacionaria en un factor de 50.

3.2.3 Parámetros resistentes.

La Figura 19 muestra cómo influye la presión de confinamiento p en las curvas tensión-deformación de la sal para una misma velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$. La resistencia y la deformación de rotura se incrementan notablemente con el incremento de p .

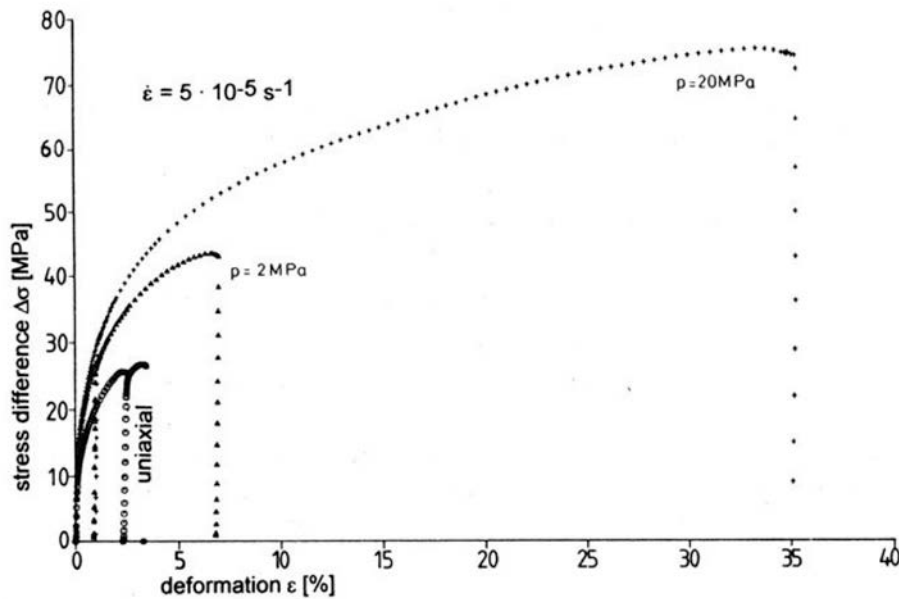


Figura 19. Resultados de compresión uniaxial y triaxial en probetas de sal de la mina Asse (Alemania) a la misma velocidad de deformación pero diferente presión de confinamiento [25].

Si ahora mantenemos constante la presión de confinamiento p , pero aplicamos distintas velocidades de deformación, también se obtienen respuestas diferentes, ver Figura 14. Para la halita, la resistencia de pico no es muy dependiente de $\dot{\epsilon}$. En cambio, para otro tipo de rocas más frágiles la resistencia se incrementa considerablemente con el incremento de $\dot{\epsilon}$, [25].

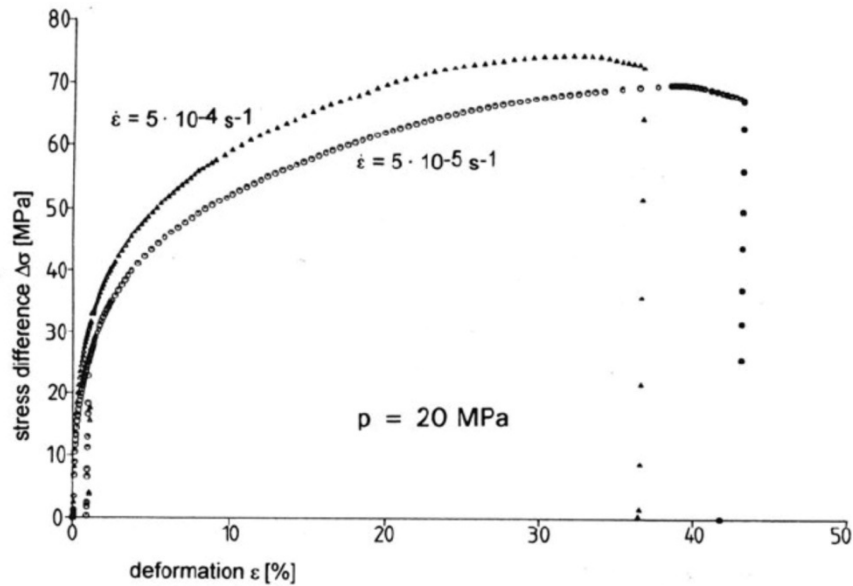


Figura 20. Ensayos triaxiales sobre muestras de sal de la mina Asse (Alemania) con la misma presión de confinamiento pero a distinta velocidad de deformación [25].

Para la sal, la deformación a rotura es mucho más dependiente de $\dot{\epsilon}$ que para las rocas frágiles. Hay que señalar que si se llevara a cabo un ensayo a un valor suficientemente bajo de $\dot{\epsilon}$ entonces el ensayo se convertiría en una prueba de fluencia sin rotura a corto plazo (aunque tal vez con fluencia terciaria después de un gran periodo de tiempo). En la Figura 21 se muestra la resistencia de pico de la roca salina a partir de un gran número de ensayos triaxiales realizados sobre halita para varios valores de velocidad constante de ensayo $\dot{\epsilon}$ y a varias presiones de confinamiento p . La línea superior representa el contorno de la curva de fluencia estacionaria a 22 °C.

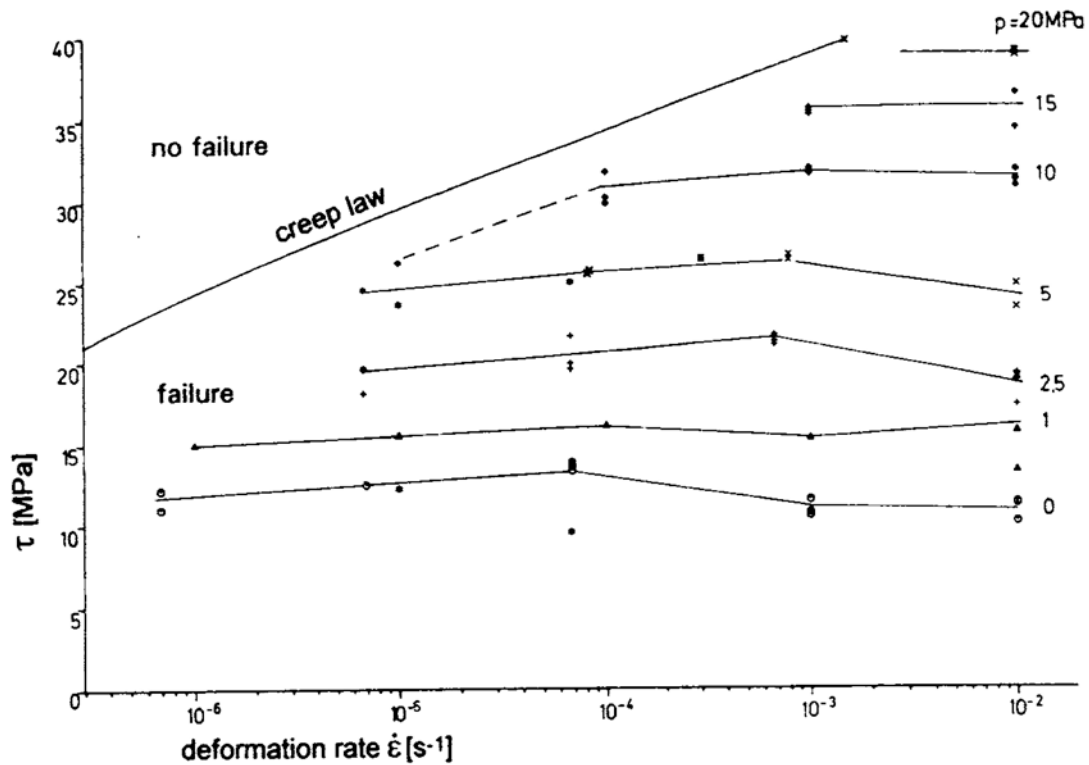


Figura 21. Resistencia de la halita proveniente de la mina de Asse (Alemania) determinada mediante ensayos triaxiales sobre muestras cilíndricas a varias presiones de confinamiento p y a varias velocidades de deformación $\dot{\epsilon}$, a temperatura estándar [25].

3.2.4 Parámetros elásticos.

La obtención práctica del módulo “elástico” no es tan fácil como puede parecer debido a que los resultados de los ensayos pueden estar fuertemente influenciados por el comportamiento diferido del material, sobre todo si los ensayos están realizados a velocidades bajas, por la inevitable presencia de deformación viscoelástica a cualquier velocidad de carga.

En función de la porción de la curva tensión-deformación que se considere, [9] indica que pueden obtenerse tres tipos diferentes de módulos: secante, tangente y medio, Figura 22. El mismo autor indica que el módulo medio aplicado en la parte de la curva tensión-deformación donde cambia la convexidad (y donde la mayoría de las posibles micro grietas existentes están cerradas y aun no se han abierto de nuevas) es el que

probablemente pueda proporcionar un valor que pueda llamarse “modulo elástico”. También indica que las curvas tensión-deformación no son ni siquiera únicas dado que son muy sensibles a la velocidad de carga, y por tanto tampoco lo son los módulos elásticos determinados a partir de ellas. Respecto la determinación del módulo elástico en procesos de descarga, también indica que pueden aparecer durante los ciclos de carga/descarga bucles de histéresis significativos, no siguiendo siempre la descarga una línea recta adecuada.

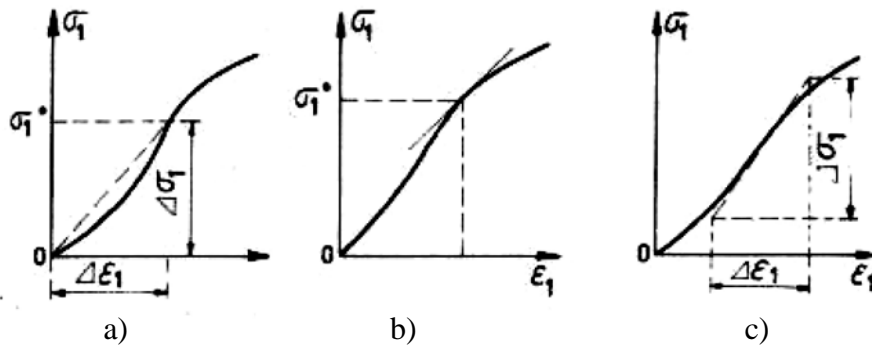


Figura 22. Determinación del módulo de Young: a) secante, b) tangente, c) medio [9].

Otra alternativa para la obtención de las propiedades elásticas consiste en medir la velocidad de propagación de ondas longitudinales y de corte, obteniéndose de esta forma el módulo elástico dinámico. [25] reporta un módulo dinámico para la halita de 36,7 GPa.

En [3] se da una recopilación del módulo elástico y coeficiente de Poisson para la halita de diez procedencias diversas, Figura 23. Estos parámetros se han obtenido de las ramas de carga/descarga de ensayos de resistencia.

Mines	Young's modulus GPa			Poisson's ratio ν		
	Mean	δ	Range	Mean	δ	Range
SE New Mexico	n.a.	n.a.	29.6 – 36.5	n.a.	.17 – .26	
Lyons	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Permian	26.6	3.7	19.0 – 33.4	.33	.05	.24 – .41
Paradox	31.0	3.4	25.2 – 36.3	.36	.10	.09 – .50
Jefferson Island	29.5	3.5	25.0 – 34.4	.29	.07	.17 – .39
Weeks Island	30.5	7.1	21.5 – 42.3	n.a.	n.a.	n.a.
Côte Blanche	24.1	Only one test		.41	Only one test	
Avery Island	30.6	5.8	21.0 – 38.2	.38	.06	.31 – .47
Richton	31.5	3.0	26.7 – 36.4	.36	.09	.21 – .55
Vacherie	31.1	3.5	26.7 – 37.6	.34	.03	.29 – .39

n.a. = not available; δ = standard deviation

Figura 23. Parámetros elásticos a temperatura estándar de diez rocas salinas naturales [3].

3.2.5 Parámetros reológicos.

La fluencia estacionaria o secundaria puede describirse mediante un modelo Norton-Hoff, o ley potencial, del tipo:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = A(\sigma_1 - \sigma_3)^n \exp(-Q/RT) \quad (3.1)$$

donde σ_1, σ_3 representa la tensión principal mayor y menor respectivamente, T es la temperatura absoluta y A , n y Q/R son tres constantes que deben determinarse experimentalmente.

En [5] se da una buena recopilación de los parámetros reológicos de esta ley para sales de diversas procedencias.

En [26] se realizan ensayos de compresión simple sobre halita y se ajustan los parámetros de un modelo reológico de Maxwell para reproducir el comportamiento tensión/deformación baja carga uniaxial. Los valores que obtienen se dan en la Figura 24.

Specimen No.	Strain Rate (s ⁻¹)	Failure Strain (%)	Failure Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Maxwell's Viscosity (MPa.s)
B9	0.00128	2.0	27.4	8.2	22,000
B20	0.00131	1.8	25.5	9.0	21,000
B5	0.00013	4.7	31.6	14.3	250,000
B6	0.00013	2.7	23.0	13.7	175,000
B36	0.00006	3.0	23.8	12.9	435,000
B40	0.00006	5.1	34.4	19.0	315,000

Figura 24. Parámetros reológicos calculados a partir de ensayos de compresión a distintas velocidades [26].

Respecto la silvinita decir que la cantidad de información disponible en la literatura es muy inferior respecto la halita. [27] realizan una campaña de ensayos para determinar las velocidades de deformación de fluencia estacionaria en muestras con diverso contenido de halita y silvinita, obteniendo que a mayor contenido de KCl, mayor velocidad de deformación. Figura 25. También hacen determinaciones de las tensiones de corte que provocan microfracturación, estimación del modulo de Young y coeficiente de Poisson.

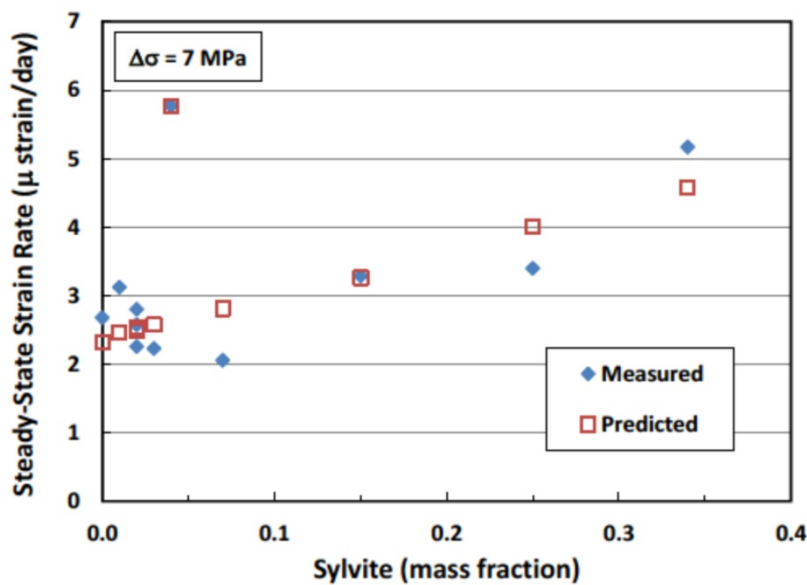


Figura 25. Velocidad de deformación fluencia estacionaria vs. contenido en silvinita, para una tensión desviadora de 7MPa [27].

3.2.6 Tenacidad de fractura

Se ha realizado una búsqueda para localizar publicaciones relacionadas con ensayos de fractura sobre rocas salinas. Los resultados son muy escasos.

Silberschmidt&Silberschmidt [10] obtienen datos de tenacidad de fractura en modo I (K_{IC}) para la sal obtenidos mediante ensayo de la viga con tres puntos de apoyo, (*three-point-bending*) y muestras de $450 \times 100 \times 50$ mm y $360 \times 80 \times 40$ mm, obteniendo un valor de $0,67 \pm 0,09$ MPa·m^{1/2}. También presentan valores de tenacidad de fractura en modo II para halita y carnalita (cloruro de potasio y magnesio) obtenidos mediante un dispositivo especialmente diseñado para aplicar cargas que permiten la determinación de la tenacidad de la fractura en modo II, ver Figura 26. Las muestras empleadas tienen un tamaño de $140 \times 140 \times 20$ mm con dos entallas iniciales a una distancia de 35 mm entre ellas.

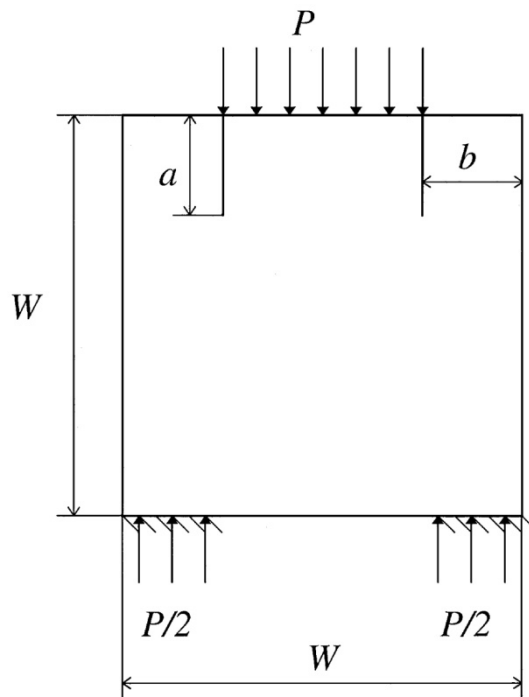


Figura 26. Esquema de cargas del ensayo para la determinación del valor de tenacidad de fractura en modo II, K_{IIC} . Dimensiones de las muestras: $W = 140$ mm, grosor 20 mm, $b = 52$ mm. Longitud de entalla a entre 42 y 70 mm [10].

También realizan una investigación adicional para estudiar la sensibilidad de K_{IIC} frente a la velocidad de desplazamiento impuesta, cambiando ésta entre 0,05 y 10 mm/min, ver Figura 27.

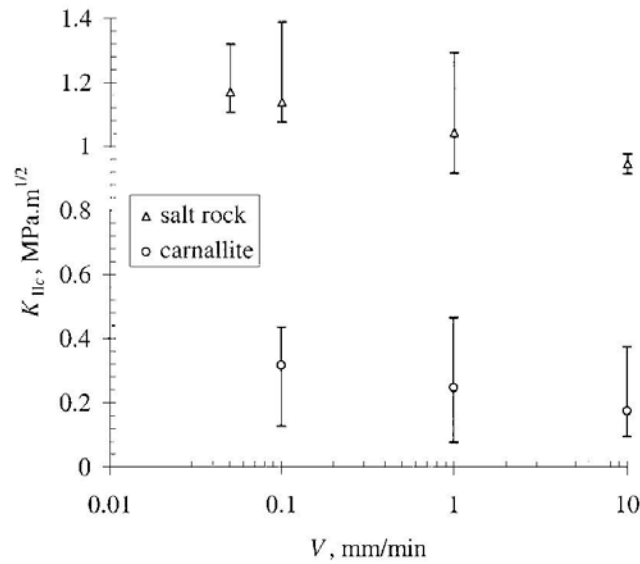


Figura 27. Dependencia del valor de K_{IIC} de tenacidad de fractura en modo II respecto la velocidad de desplazamiento [10].

Como puede observarse en la Figura 27 la dispersión de resultados es elevada, posiblemente debida al poco tamaño de la muestra en relación con el tamaño de los granos de la roca. Aun así, puede observarse que la tenacidad (aparente) a la fractura se reduce al aumentar la velocidad a la que se aplica el desplazamiento impuesto. Los autores obtienen que la dependencia entre K_{IIC} y la velocidad de deformación puede aproximarse por la siguiente relación:

$$K_{IIC} = -C_1 \lg \dot{\epsilon} + C_2$$

Con unos valores de los coeficientes C_1 y C_2 iguales a 0,1 y 1,04 para la halita y 0,068 y 0,243 para la carnalita pero no hacen ninguna interpretación del porque de estos resultados.

En la simulación numérica de fracturación hidráulica y neumática para la determinación de tensiones in-situ [12] se utilizan valores de tenacidad de fractura para la sal de $K_{IC} = 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, valor obtenido experimentalmente mediante el ensayo de la viga con tres puntos de apoyo y con muesca en forma de chevron, de acuerdo con ISRM standard (1988). No dan más detalles sobre este aspecto.

No se ha localizado ninguna publicación relacionada con ensayos *WST* sobre rocas salinas.

3.2.7 Parámetros resistentes de rocas de la Cuenca Potásica Catalana.

Los parámetros resistentes de las diversas rocas que componen el yacimiento del cual se han extraído las muestras para el presente TFM están bien determinados en diversas campañas de investigación que han llevado a cabo las empresas explotadoras. Campos de Orellana [8] realiza 21 ensayos de tracción indirecta (brasileño) sobre muestras de 10 cm de diámetro y 10 de longitud, 70 ensayos triaxiales sobre muestras de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro con presión de confinamiento de hasta 30 MPa y 213 ensayos de compresión simple sobre muestras de diferentes formas (cilíndricas, cúbicas y prismáticas). No se dan datos de las velocidades a las que se han realizado los diversos ensayos. Con los resultados de estos 304 ensayos determina los parámetros elastoplásticos de las 7 capas salinas presentes en el yacimiento. En la Figura 28 se dan los valores obtenidos por el autor.

	Elastic moduli (MPa)			Cohesions (MPa)			Uniaxial strength (MPa)			Tensile strengths (MPa)			Angles of friction (°)		
	E	S.D. (%)	N	c	S.D. (%)	N	σ_c	S.D. (%)	N	σ_t	S.D. (%)	N	ϕ	S.D. (%)	N
Upper salt	740	± 19	8	2.7	± 48	5	25	± 28	6	2.5	± 17	3	45	± 33	5
Carnallite	810	± 19	8	2.7	± 27	5	4	± 17	6	1.5	± 19	3	40	± 25	5
B Bed	1060	± 14	8	3.0	± 50	5	28	± 28	6	3.0	± 20	3	45	± 29	5
Intermediate salt	530	± 21	8	2.1	± 38	5	24	± 57	6	2.5	± 17	3	45	± 30	5
A Bed	930	± 10	8	2.7	± 48	5	25	± 4	6	2.5	± 20	3	45	± 31	5
Footwall salt	700	± 16	8	1.9	± 51	5	18	± 24	6	2.0	± 17	3	45	± 28	5
Lower salt	1400	± 13	8	5.5	± 45	5	27	± 20	6	3.0	± 18	3	35	± 17	5

	Poisson's ratio			Critical mean stress (MPa)			Angles of dilation (°)	Field stress ratio
	ν	S.D. (%)	N	σ_m^*	S.D.	N		
Upper salt	0.18	± 29	8	30	—	1	In the range	In the range
Carnallite	0.21	± 27	8	25	—	1	0°– ϕ	0.7–1.3
B Bed	0.18	± 29	8	30	—	1	Undefined.	Undefined.
Intermediate salt	0.18	± 28	8	30	—	1		
A Bed	0.18	± 30	8	30	—	1		
Footwall salt	0.18	± 26	8	30	—	1		
Lower salt	0.20	± 24	8	35	—	1		

Note: N is the no. of samples tested or readings taken for the determination of each parameter.

Figura 28. Parámetros resistentes de los diversos litotipos presentes en la Cuenca Potásica Catalana [8].

3.3 Inestabilidades de galerías por fluencia.

El mecanismo mediante el cual la fluencia favorece la caída de techos está relacionado con la estructura geológica del yacimiento. Durante los procesos de evaporación y precipitación de la lengua marina que conduce a la formación del yacimiento, se van depositando ocasionalmente intercalaciones muy finas (de orden milimétrico o menor) de arcillas y limos entre las capas de halita, silvinita y carnalita que forman el depósito. Estas arcillas provienen de los aportes de sedimentos de los ríos que llegaban a la zona endorreica.

La Figura 29, representa una galería excavada en un yacimiento salino con gran cantidad de pliegues debidos al comportamiento plástico de las sales sometidas a esfuerzos tectónicos e intercalaciones arcillosas.

La Figura 29a) muestra una galería recién excavada, sin ningún problema de inestabilidad. Al activarse la deformación por fluencia diferida en el tiempo, los lechos arcillosos actúan como zona de despegue entre capas. Esta separación de estratos provoca en el contorno de la galería la aparición de macrofisuras entre capas, Figura 29b), aunque en este caso no se trata de un fenómeno de fractura de la matriz rocosa propiamente dicha. El comportamiento mecánico de estas fisuras estará condicionado por los parámetros resistentes de la junta preexistente, cohesión y ángulo de rozamiento. Obsérvese también en la misma figura que debido a los esfuerzos provocados por el peso propio del bloque parcialmente independizado del macizo aparece, ahora sí, una fractura (señalada con un círculo) a través de la matriz rocosa. Al persistir la situación, la fractura va progresando a través de la matriz rocosa, Figura 29c). Finalmente se produce la rotura total del puente de roca que mantenía unido el bloque al macizo, produciéndose la llamada “caída de liso”, Figura 29d).

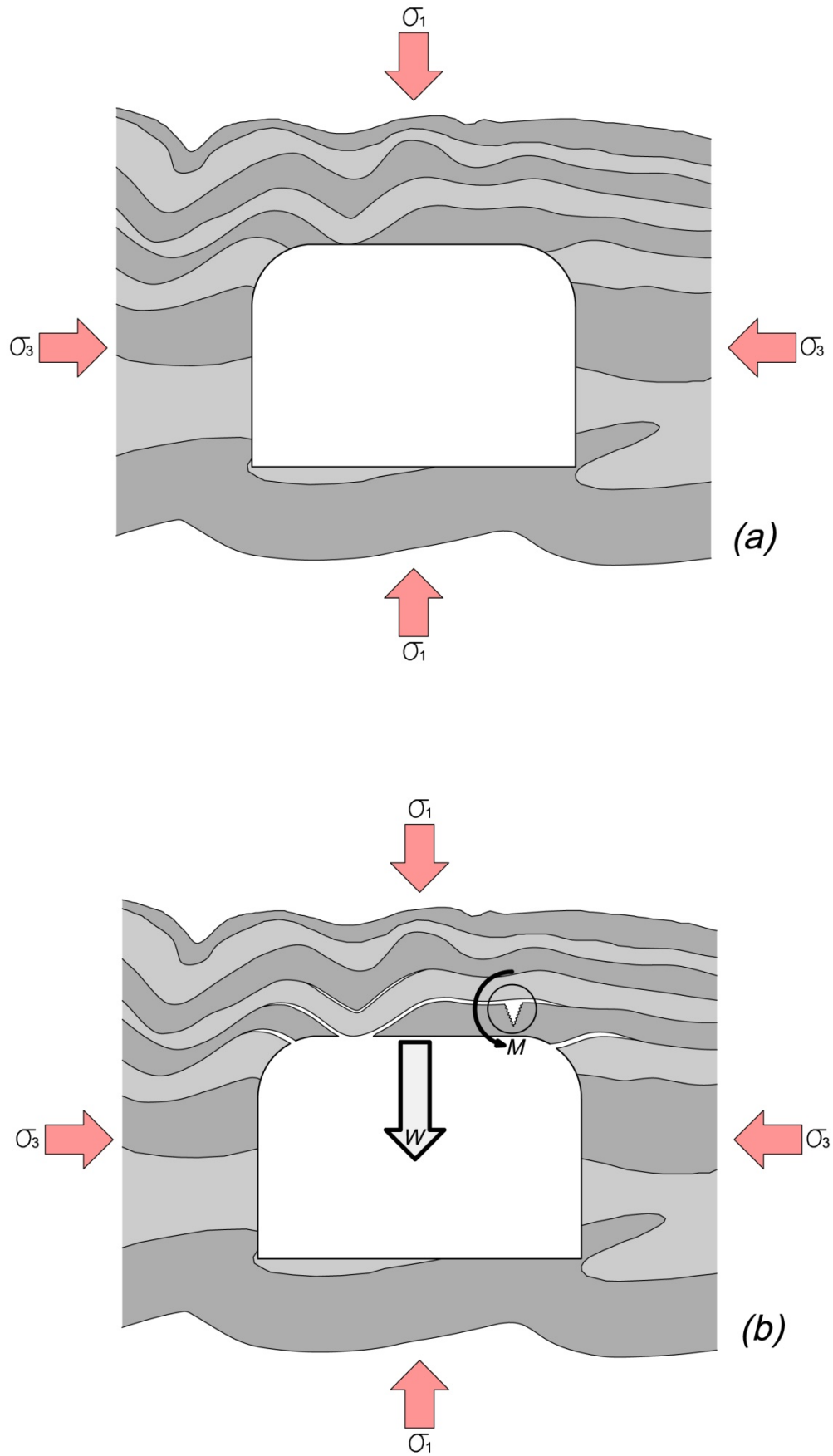


Figura 29. Modelo conceptual de formación y caída de un liso (explicación en el texto).

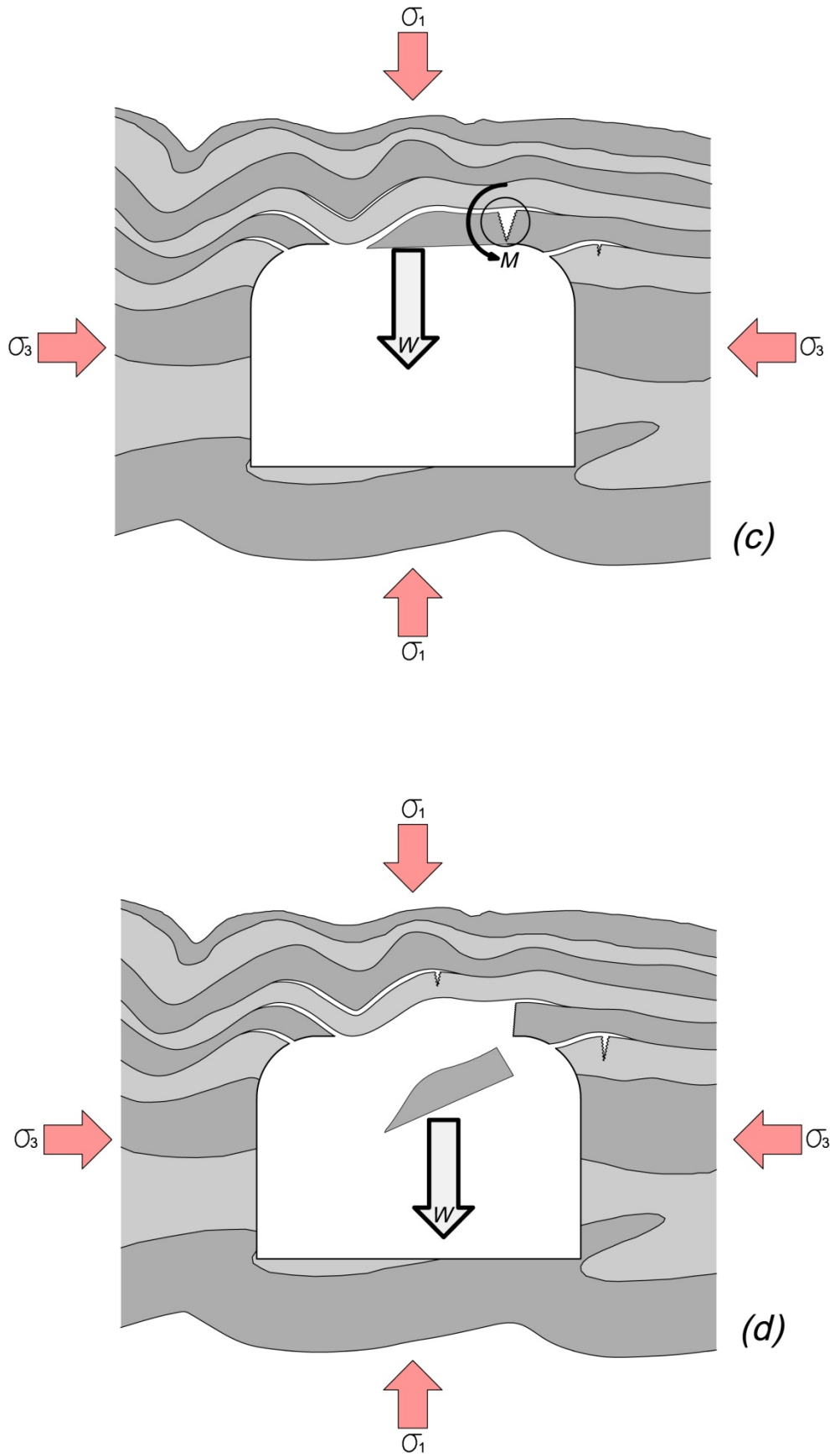


Figura 29 (continuación). Modelo conceptual de formación y caída de un liso.

Las Figura 30 y 31 muestran ejemplos de fracturas a través de la matriz rocosa y separación de estratos por discontinuidades preexistentes.

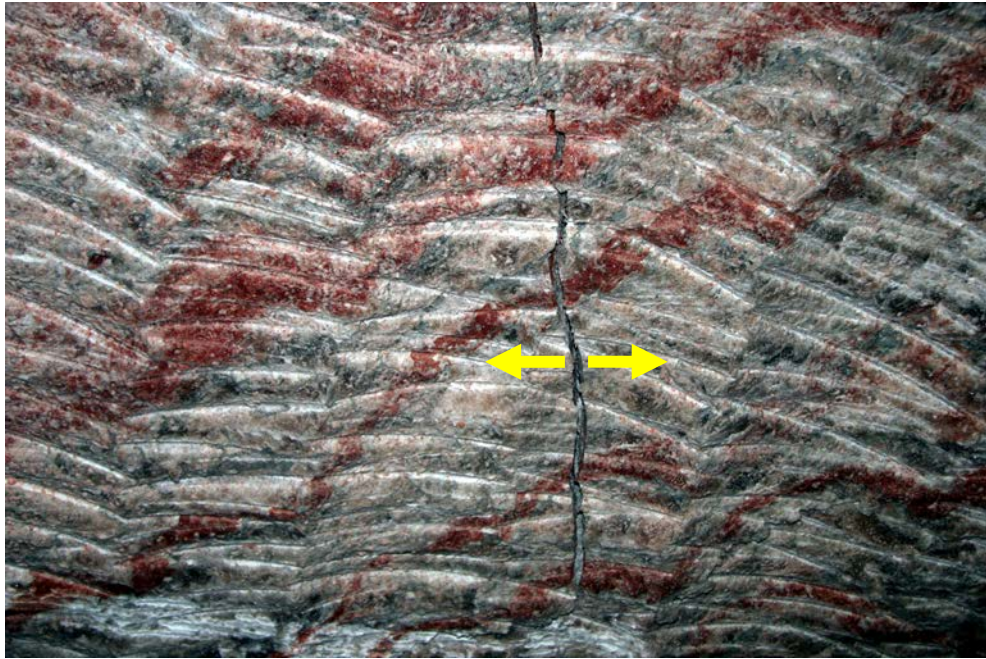


Figura 30. Fractura a través de la matriz rocosa.



Figura 31. Fisuras por separación de estratos.

Como es fácil suponer, las posibles combinaciones entre situación de lechos arcillosos, tamaños de pliegues, potencias de capas, litologías, dirección e inclinación de la galería, tensiones circundantes, etc. son casi infinitas, por lo que la mecánica de la caída de cada bloque es enormemente variable.

El bulonado sistemático y el saneo continuo son las mejores herramientas para garantizar la seguridad en las galerías. Pese a ello, es imposible alcanzar al 100% la estabilidad de techos y paramentos debido a que:

- El bulonaje no detiene la fluencia.
- La fluencia continua del terreno hacia la galería provoca el aumento progresivo de la carga sobre los bulones, produciéndose en muchos casos la rotura del mismo por la zona de rosca de la tuerca de apriete. Además, el ambiente salino junto a la existencia de esfuerzos de tracción en los bulones provoca la aparición de fenómenos de corrosión bajo tensión en el acero, acortando su vida útil y cambiando su comportamiento de dúctil a frágil, [28], [29].
- La gran variabilidad de espesores de capas y situación de los niveles de despegue o de creación de nuevas fracturas hace que en ocasiones la longitud de bulonado sobre terreno “firme” no sea lo suficientemente elevada para soportar las cargas a las que está sometido. Un ejemplo de esta situación se muestra en la Figura 32 donde se representa la longitud efectiva resistente del perno en función de donde esté situado un hipotético nivel de despegue entre estratos.

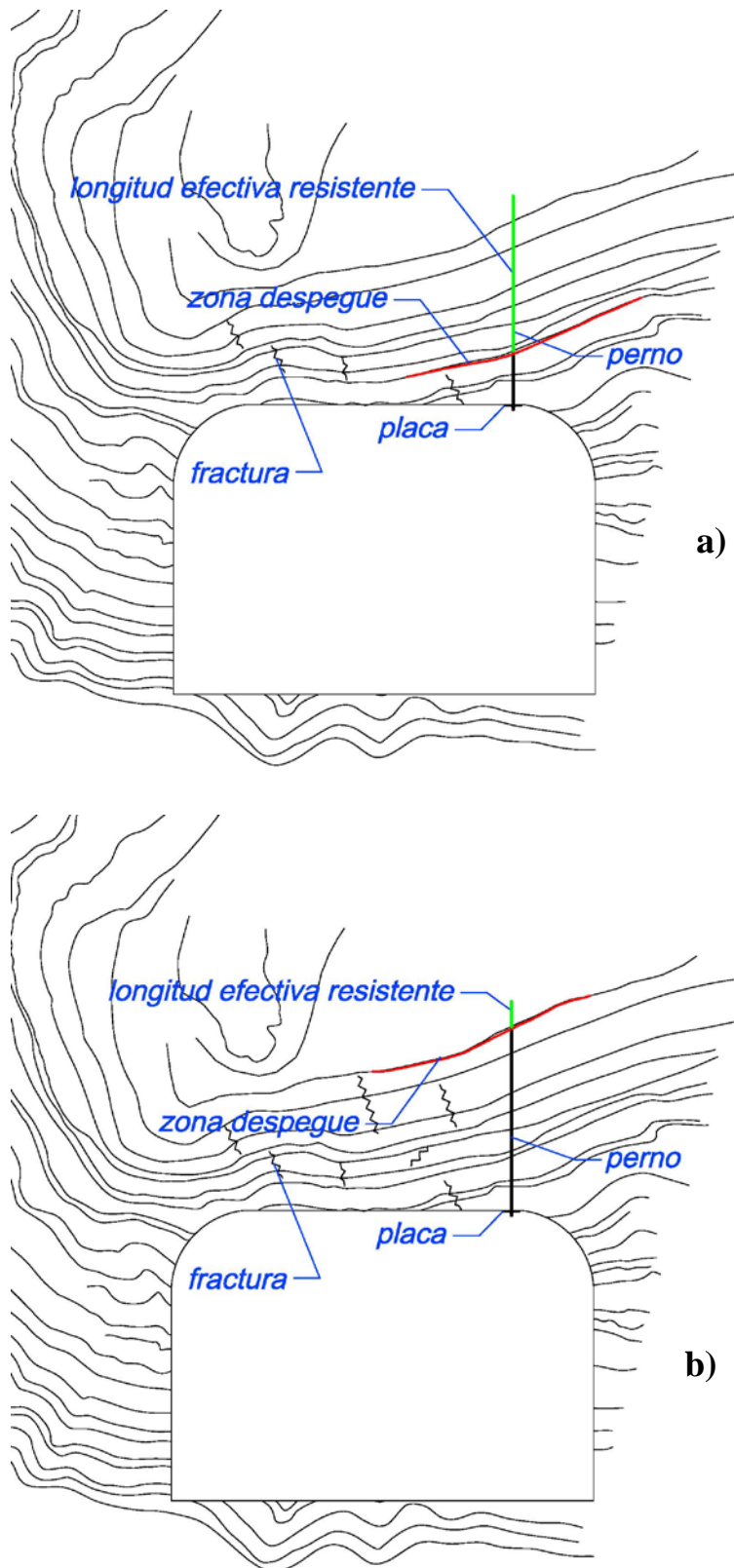


Figura 32. Longitud efectiva resistente de un bulón en función de la situación de una zona de despegue.
a) longitud suficiente para garantizar estabilidad, b) longitud insuficiente.

4 Metodología experimental

Mediante el ensayo de Wedge Splitting Test (WST) es posible estudiar cómo se desarrolla una fractura en una probeta de roca de forma controlada y estable, para distintas velocidades de abertura, poniéndose de manifiesto su interacción con los fenómenos de deformación diferida y el comportamiento viscoelástico. De estos resultados pueden deducirse valores de los parámetros de resistencia y fractura, principalmente la resistencia a la tracción σ_t y la energía de fractura en modo I, G_f^I .

En este trabajo se han realizado un total de quince ensayos WST a tres velocidades distintas de abertura. También se han realizado nueve ensayos de fluencia, obteniendo la ley potencial que mejor se ajusta a los datos experimentales y dos ensayos de compresión simple a distintas velocidades de carga para la determinación del módulo tangente inicial. Todo ello ha de servir de base para determinar parámetros, así como para el desarrollo de futuros modelos numéricos más ajustados.

4.1 Ensayo Wedge Splitting Test (WST)

Los ensayos estables de mecánica de fractura, esto es, con la obtención de la rama de post-pico en el conjunto del diagrama de carga-deformación, son necesarios para la determinación de las propiedades de la mecánica de fractura tales como la energía específica de fractura G_f y el diagrama de *strain softening*. Una manera directa de determinar estas propiedades de los materiales podría ser el ensayo de tracción directa con deformación controlada. Sin embargo, la dificultad para realizar estos ensayos de manera estable debido a que una vez formada la grieta ésta se extiende de manera poco controlada por las pequeñas deformaciones a rotura y a la gran rigidez de las rocas hace que no sea un método apropiado. Una vía más adecuada para obtener la energía específica de fractura G_f , son los ensayos estables sobre muestras con una muesca sometidas a flexión. El ensayo de flexión de viga con tres puntos de apoyo (*three point bending test*, *TPBT*) realizados sobre materiales cuasi-frágiles es capaz de mantenerse estable en la fase de formación y propagación de fracturas.

Otro tipo de ensayo apropiado para determinar las propiedades de la mecánica de fractura es el Wedge Splitting Test, WST [31], siendo éste el utilizado en el presente trabajo.

En comparación con el ensayo de viga con tres puntos de apoyo, el WST ofrece ciertas ventajas, la principal de ellas es que se necesita mucho menos material para ensayar la muestra. Este aspecto es de crucial importancia porque como se verá en el apartado 4.1.3, la extracción de muestras de cierto tamaño de los paramentos de las galerías no es una tarea trivial. La necesidad de obtener “vigas” de sal para poder hacer ensayos tipo *TPBT*, fue la causa de que se descartara desde un principio este ensayo por la dificultad que representaba poder disponer de muestras adecuadas. El menor tamaño de las muestras ensayadas mediante el WST, trae aparejada otra ventaja como es el menor peso propio de la muestra que se traduce en un menor momento, aspecto este importante sobre todo al final del ensayo cuando colapsa la muestra. Además, el Grupo de Investigación de Mecánica de Materiales (MECMAT) de la UPC, cuenta con el *know-how* y los equipos necesarios para realizar ensayos WST [1], [2].

4.1.1 Principio de funcionamiento

Este ensayo nos permite caracterizar el desarrollo de una fractura a tracción (Modo I) en una muestra en la que previamente hemos realizado una entalla para localizar el inicio de fractura.

En la Figura 33 y se muestra el dispositivo de aplicación de carga y la geometría de la muestra y en la Figura 34 la descomposición de fuerzas aplicadas [1]. El espécimen tiene una ranura o acanaladura en su parte superior donde se adhieren dos perfiles L de acero con rodamientos de rodillo en sus extremos. Desde el centro de la acanaladura se realiza una entalla de poco grosor para asegurar la zona de inicio y propagación correcta de la grieta. Sobre los rodamientos actúa la fuerza de separación, F_{sp} , al ir penetrando una cuña entre ellos a velocidad constante. El desplazamiento de la cuña se impone mediante una prensa con velocidad de desplazamiento controlada. Durante el ensayo, se registra la fuerza vertical, F_v aplicada por la prensa, y los desplazamientos relativos de cada par de rodamientos. A estos desplazamientos relativos nos referiremos como *COD* (*crack opening displacement*) como se muestra en la Figura 35.

Cada COD se mide con un transductor de desplazamiento LVDT que va colocado sobre el eje que une el centro de los rodillos de aplicación de fuerza de separación F_{sp} . De esta forma medimos el desplazamiento del punto colineal con el de aplicación de la fuerza que genera la fractura, y podemos por tanto calcular el trabajo realizado para fracturar la probeta.

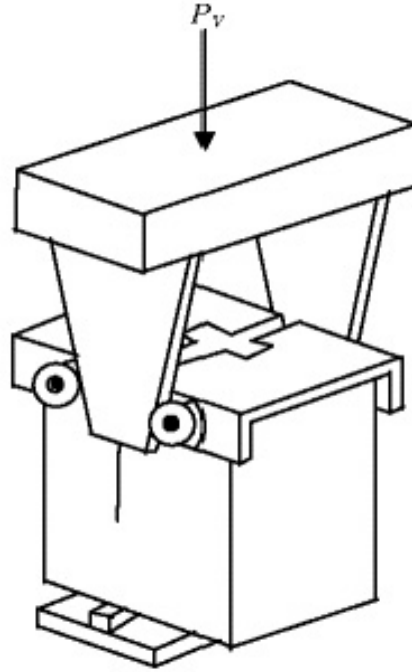


Figura 33. Esquema del equipo y configuración del ensayo WST, [1].

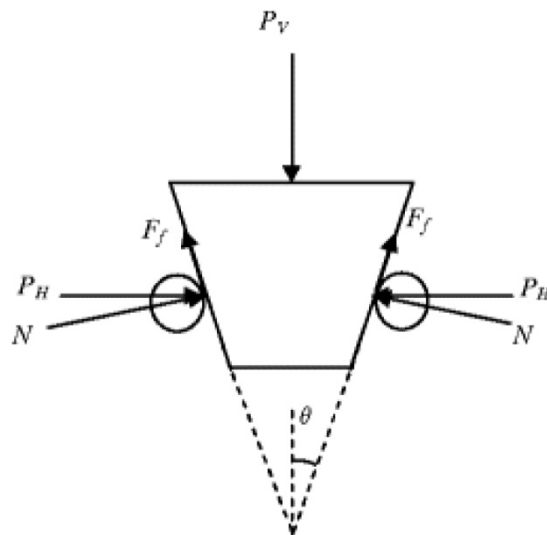


Figura 34. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas sobre la cuña de WST, [1].

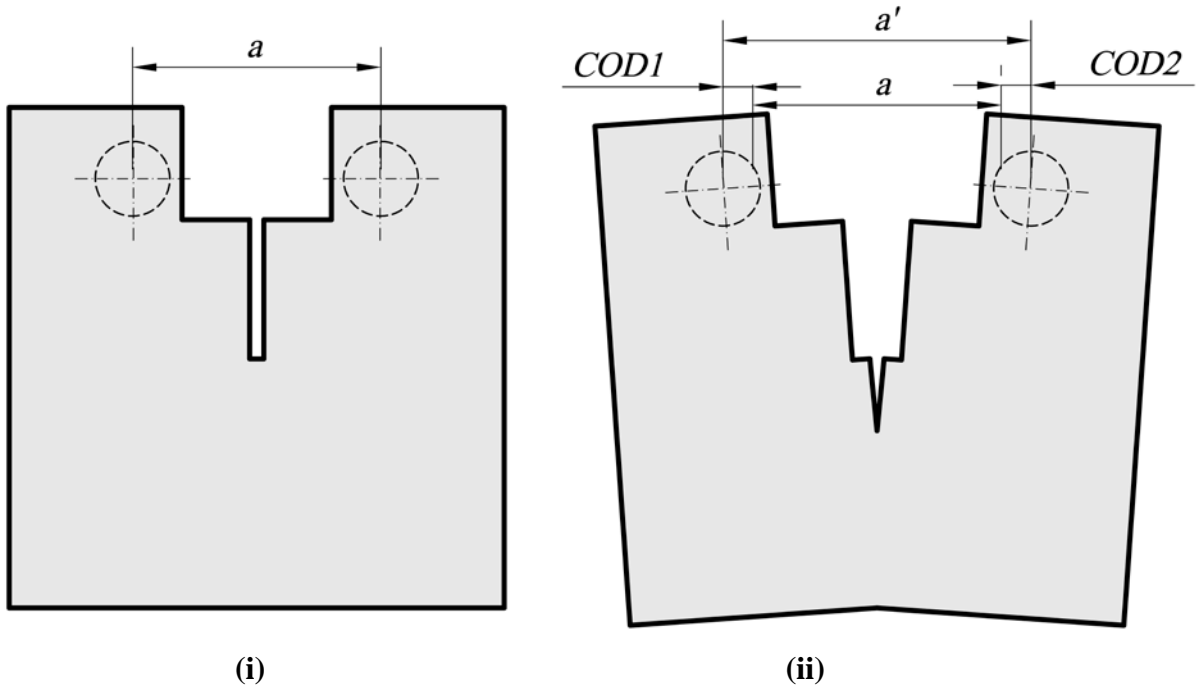


Figura 35. (i) Distancia inicial entre rodamientos antes del inicio del ensayo, a
(ii) Ensayo en progreso. Distancia entre rodamientos, a'

La relación entre la velocidad de COD y la de subida del plato y el ángulo de la cuña utilizada se da en la ecuación (4.1).

$$V_{cod} = 2 \cdot V_{plato} \cdot \tan(\alpha) \quad (4.1)$$

siendo α el ángulo de la cuña.

Para que el ensayo sea válido se requiere que la respuesta carga-COD sea estable, esto es, que no se produzcan caídas bruscas de fuerza debido a una insuficiente rigidez de la máquina de ensayo respecto la muestra (*snap-back*).

La fuerza horizontal aplicada a la muestra (P_H) se obtiene mediante la ecuación (4.2), donde P_V es la fuerza vertical aplicada, θ es el ángulo de la cuña y μ es el coeficiente de fricción entre la cuña y el rodillo.

$$P_H = \frac{1 - \mu \tan \theta}{2(\mu + \tan \theta)} P_V \quad (4.2)$$

Dado que la influencia de la fricción es pequeña [32] la ecuación (4.2) puede aproximarse a:

$$P_H = \frac{P_V}{2 \tan \theta} \quad (4.3)$$

Si el proceso de fractura es estable, la energía específica de fractura del material en modo I, G_f^I , puede obtenerse de la respuesta $P_H - COD$ de la muestra usando la ecuación. (4.4) donde A_{lig} es el área de la superficie de ligamento ($A_{lig} = L \cdot d$, Figura 36), y el COD considerado es el promedio del COD1 y COD2 medidos en cada rodamiento.

$$G_f^I = \frac{1}{A_{lig}} \int_0^{+\infty} P_H dCOD = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (4.4)$$

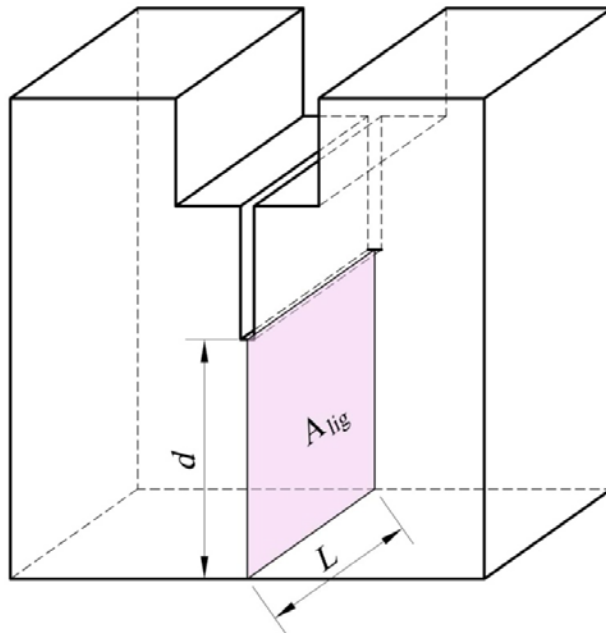


Figura 36. Definición del área de ligamento (A_{lig})

Las curvas de respuesta del ensayo se muestran en Figura 37 (fuerza vertical y COD vs. tiempo) y en la Figura 38 (fuerza horizontal vs. COD). El área bajo la curva de la Figura 38 es el trabajo que empleamos para fracturar la probeta.

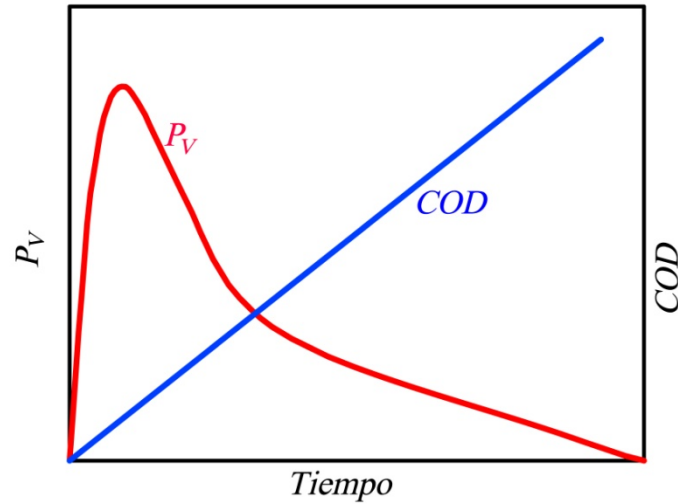


Figura 37. Representación esquemática de las curvas de respuesta de un ensayo WST. P_V y COD vs. tiempo

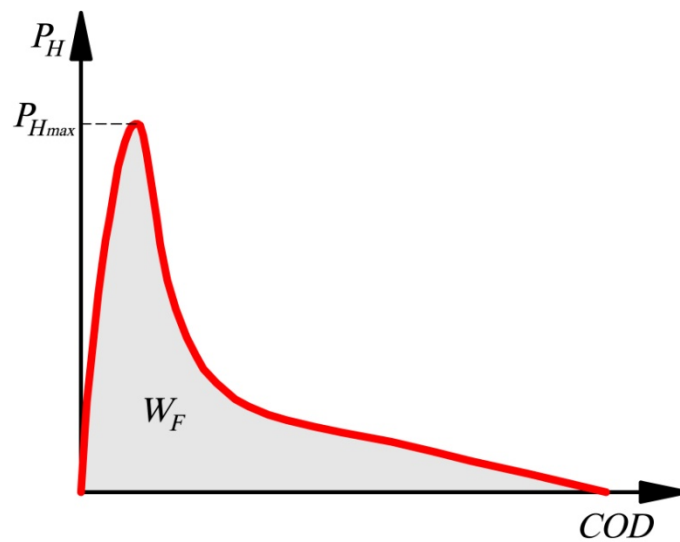


Figura 38. Representación esquemática de la respuesta de un ensayo WST. P_H vs. COD . El área sombreada nos define el trabajo realizado sobre la muestra. Antes de alcanzarse el valor máximo de la fuerza de separación, P_{Hmax} , las fracturas ya empiezan a crearse y propagarse.

Si el material ensayado no presenta deformaciones significativas por fluencia, la energía específica de fractura G_f^I puede considerarse como un parámetro del material,

es decir, independiente de la geometría de la probeta. De esta forma estamos suponiendo que todo el trabajo realizado sobre la probeta se “consume” en el proceso de fractura (creación de nuevas superficies, disipación sonora, térmica, etc).

En cambio, cuando el material de la probeta presenta deformaciones importantes por fluencia esta hipótesis ya no es válida dado que además del trabajo “consumido” en el proceso de fractura, parte del W_F se consume en deformar viscoelásticamente (fluencia) el cuerpo de la probeta. Este trabajo de fluencia, a diferencia del trabajo de fracturación, no puede suponerse proporcional a A_{lig} , sino que **depende del tamaño y geometría de la probeta**. Por lo tanto, al normalizar el trabajo de fractura por el área de la superficie de fractura, W_F / A_{lig} , para probetas de sal, no estamos obteniendo un parámetro de la sal sino de la probeta de sal. De aquí en adelante, en el contexto de este TFM, a este parámetro lo llamaremos “Energía específica de fractura aparente” o, más abreviadamente, “Energía aparente de fractura”, G_{fa}^I .

4.1.2 Geometría de las muestras

La configuración del ensayo permite la utilización de diversas geometrías de muestras, dando gran versatilidad en el aprovechamiento de especímenes. En la Figura 39 se muestran diferentes posibles formas. Para poder comparar directamente las curvas de $COD-P_H$ obtenidas en distintos ensayos, las probetas deben ser de idéntica geometría y dimensiones. Si las probetas tienen la misma geometría y dimensiones en los planos normales a la acanaladura pero diferente profundidad, como las mostradas en la Figura 40, pueden compararse las curvas normalizando la F_H en relación a la profundidad L de la probeta. En este caso también debemos asumir que la profundidad es lo suficientemente grande como para considerar el material homogéneo.

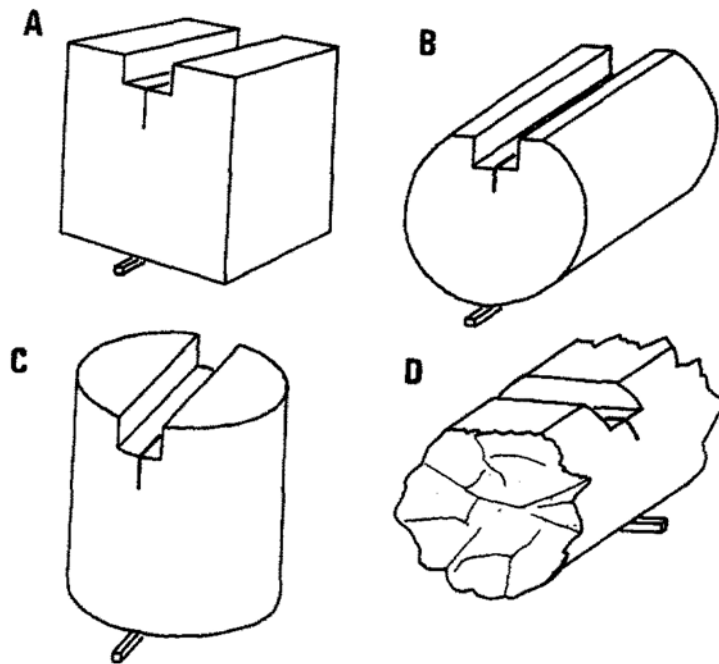


Figura 39. Diferentes formas posibles de las probetas, [31].

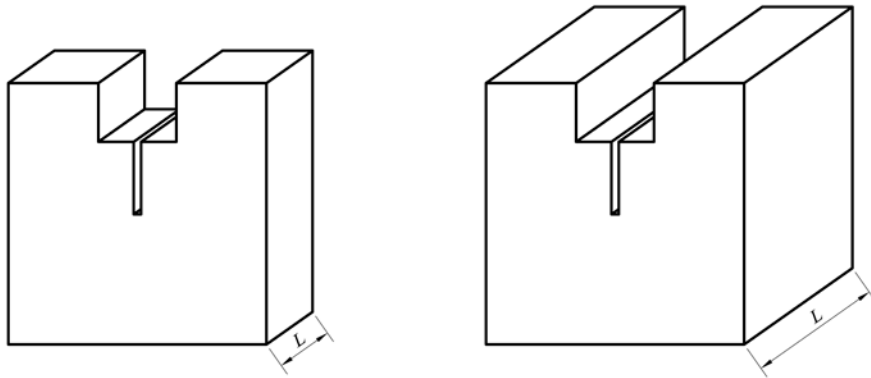


Figura 40. Probetas con idéntica sección transversal a la acanaladura pero distinta profundidad. Podemos comparar la curva $F_H - COD$, normalizando la F_H con la profundidad L .

4.1.3 Obtención de las muestras

En este apartado se hace una descripción de los métodos empleados para la obtención de muestras. Han sido unas tareas que han consumido mucho tiempo por varios motivos:

- El entorno ciertamente hostil de una mina subterránea, con condiciones ambientales adversas y posibilidad de acceso limitado.
- La naturaleza soluble de la roca, que impide el uso de agua para el tallado y extracción de muestras con herramientas de corte y coronas de widia, como es habitual en otros tipos de rocas.
- La necesidad de buscar herramientas e instalaciones con maquinaria industrial para pruebas-piloto.
- La falta de experiencia previa en la extracción de este tipo de rocas y condiciones, que ha llevado a improvisar métodos, en algunas ocasiones mediante un sistema de prueba-error.

Por todo ello algunos de los trabajos realizados se han quedado en meras tentativas

Los métodos empleados expuestos por orden cronológico para la obtención de testigos aptos para los ensayos han sido:

- a) Tallado mediante corona de diamante de fragmentos recogidos de la explotación y fijados con mortero.

En el interior de las galerías de potasa es fácil encontrar bloques desprendidos provenientes del saneo de techos. En la Figura 41 se muestra una acumulación de estos fragmentos donde se observa que la mayoría no son adecuados, bien por un tamaño excesivo que no permite su recogida y manipulación o bien por un tamaño insuficiente para poder tallar una muestra de dimensiones mínimas aceptables.

Dado que la idea original de este trabajo era centrarse en el estudio de la potasa más que en el de la halita, se recogen fragmentos cuya litología predominante sea de silvinita, aunque es difícil encontrar fragmentos de tamaño adecuado compuestos al 100% por este mineral porque el yacimiento presenta muchas intercalaciones de sal.

En la Figura 42 se muestra parte de los fragmentos recogidos y trasladados al laboratorio de Mecánica de Rocas de la ETSECCPB.



Figura 41. Fragmentos desprendidos de rocas salinas provenientes del saneo de galerías.



Figura 42. Bloques recogidos de la explotación y trasladados al laboratorio de Mecánica de Rocas.

La morfología irregular de los bloques hace que sea difícil su tallado directo para darles una forma adecuada apta para los ensayos. Para superar este inconveniente se colocan las muestras en un molde de metacrilato y se fijan rellenando todo el espacio con mortero de cemento.

Algunos bloques tienen unas dimensiones superiores a las del molde, Figura 43, por lo que ha sido preciso realizar cortes con una sierra manual para adaptar sus medidas, Figura 44.



Figura 43. Bloque de tamaño superior a las medidas del molde de encofrado



Figura 44. Tallado manual para adaptar las medidas del bloque a las del molde de encofrado.

En la Figura 45 se puede ver una de las muestras con el molde-encofrado parcialmente relleno de mortero y en la Figura 46 la misma muestra una vez completado el relleno con el mortero fijador.



Figura 45. Proceso de relleno del molde con mortero.

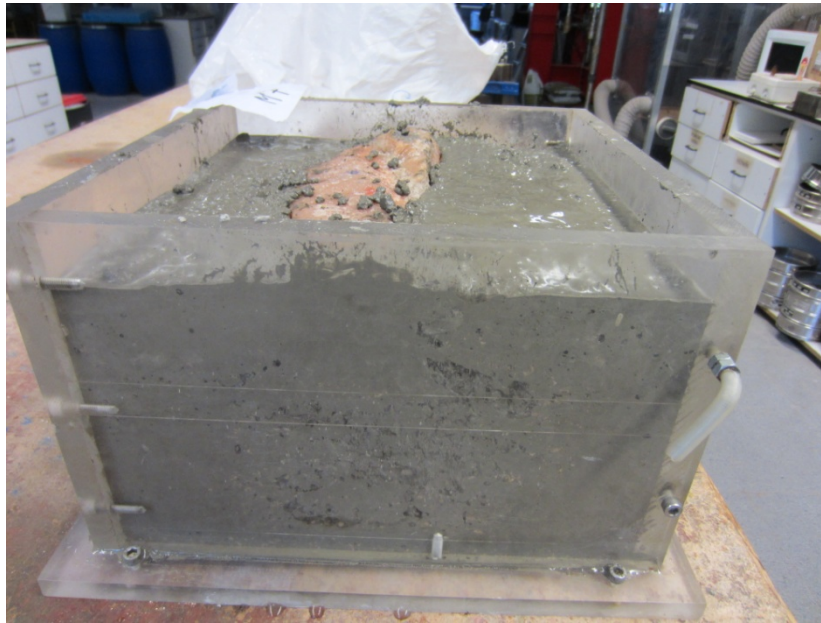


Figura 46. Relleno completo con mortero fijador.

Transcurrido el tiempo de fraguado se desencofran las muestras y se limpian los moldes, obteniéndose un bloque ortoédrico que alberga en su interior el fragmento de roca salina, apto para ser tallado mediante una corona circular de widia. En la Figura 47 se observa el bloque presentado en la máquina de corte a punto de iniciarse el tallado.



Figura 47. Bloque listo para iniciar el tallado de la muestra

La máquina de corte pertenece al laboratorio de Tecnología de Estructuras, Materiales y Construcción - UPC. Al ser la roca soluble se abre la llave de paso de agua de manera intermitente para introducir un pequeño caudal que permita una mínima refrigeración de la corona y la evacuación de detritos. Pese a estas precauciones todas las muestras sufren disolución y se degradan, Figura 48. El resultado final es que no se logra obtener ninguna probeta con este método.



Figura 48. Muestra parcialmente disuelta y degradada durante el proceso de tallado

b) Tallado mediante sierra circular y mesa con control numérico de fragmentos recogidos de la explotación.

Como alternativa para la obtención de probetas a partir de los bloques recogidos, se realiza una prueba piloto de tallado en unas instalaciones privadas de un taller de roca ornamental dotado con sierra circular de gran tamaño y mesa con control numérico, Figura 49. Esta opción es a priori técnicamente viable pero tiene un coste económico elevado. El motivo de ello es el escaso rendimiento que se obtiene de la maquinaria al tallar una muestra de pocos kilos de peso en unas instalaciones preparadas y diseñadas

para manipular bloques de varias toneladas, Figura 50 y Figura 51. En definitiva, se tratan de unas instalaciones industriales que requieren bloques de gran tamaño para que el coste de manipulación por m³ sea razonable.

Después de la prueba piloto, el propietario del taller muestra reticencias y objeciones a continuar por la gran cantidad de polvo salino (y por tanto corrosivo) generado al no poder usar agua.

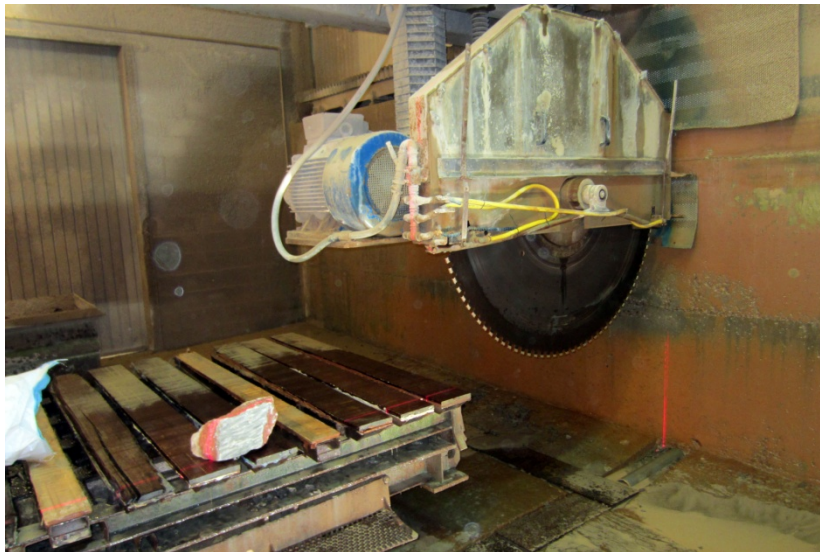


Figura 49. Mesa de corte de roca ornamental



Figura 50. Fragmento utilizado en la prueba piloto.



Figura 51. Proceso de tallado del fragmento mediante disco y mesa de corte con control numérico.

A partir de la prueba piloto realizada se obtiene un cubo de 10 cm de arista Figura 52, pero desgraciadamente presenta una grieta por lo que solo se ha podido utilizar para realizar un ensayo preliminar, ver Anexo I.

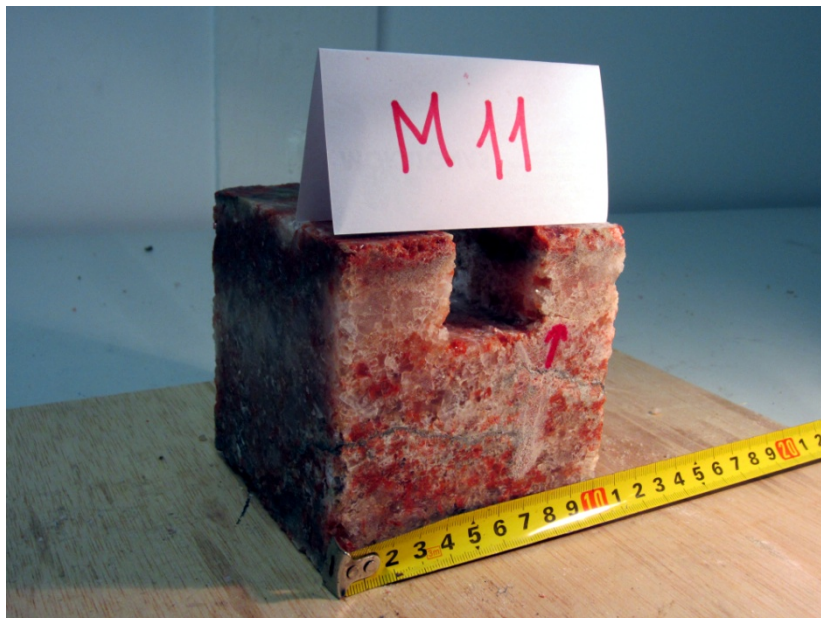


Figura 52. Probeta obtenida de 10 cm de arista en la prueba piloto realizada.

c) Tallado mediante tronadora de sierra de cinta de fragmentos recogidos de la explotación.

Buscando alternativas más económicas que la anterior surge la posibilidad de usar una tronadora de sierra de cinta de un taller de carpintería metálica. Esta maquinaria se emplea para el corte de metal, pero dada la poca dureza de las rocas salinas, también es posible su uso para el tallado de muestras de este tipo de rocas. Para no alterar la muestra debe desconectarse la bomba de taladrina que se usa para la refrigeración de la sierra de banda y seleccionar una velocidad lenta de trabajo que palie la falta de refrigeración. Para minimizar la generación de polvo por la falta de uso de fluido de refrigeración, se coloca una manguera de aspiración para recoger la mayor cantidad posible de detritos, Figura 53.

Dada la forma irregular de la muestra, en primer lugar hay que realizar unos cortes de desbastado para ir dando la forma deseada. A partir de la creación de una primera cara plana, se van realizando sucesivos cortes ortogonales girando la muestra sobre la base de apoyo hasta conseguir un cubo de 15 cm de arista, en un proceso largo y de trabajo artesanal.

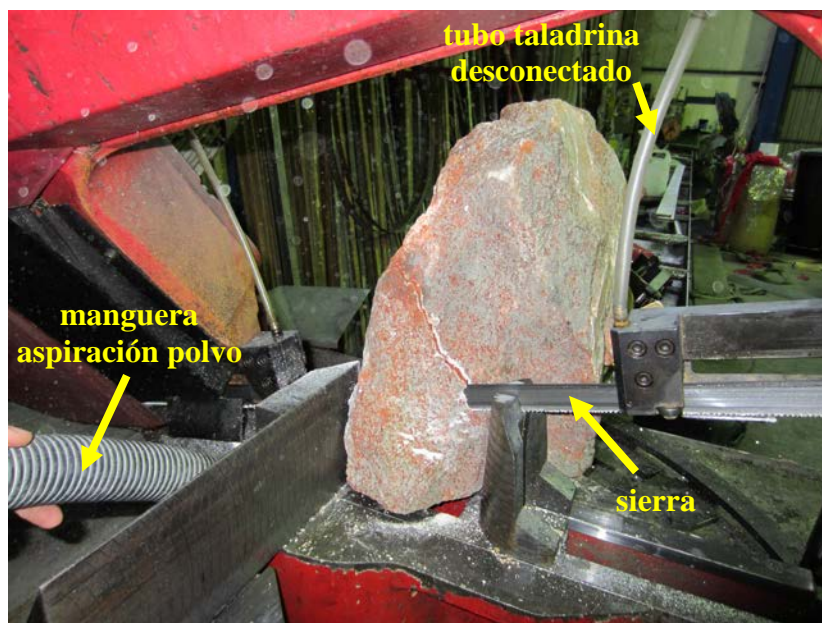


Figura 53. Corte de fragmento mediante tronadora.

Finalmente se logra obtener un cubo silvinita de 15 cm de arista, la única probeta de este mineral que se ha utilizado en el presente TFM, Figura 54.



Figura 54. a), b) y c) proceso de cortes sucesivos ortogonales con tronzadora. d) la obtención final de una probeta cúbica de 15 cm de arista

d) Extracción de bloque pseudo-ortogonal in-situ mediante sierra de sable eléctrica manual.

Para facilitar el trabajo de corte con la tronzadora expuesto en el apartado anterior se plantea la posibilidad de extraer un bloque pseudo-ortogonal directamente del paramento de las galerías. Esta muestra de morfología más regular debería servir para facilitar el trabajo de tallado con la tronzadora ya que con seis cortes (uno por cara), podría obtenerse directamente un cubo de 15 cm de arista. A parte de esta ventaja, la extracción de muestras se vuelve selectiva al poder elegir un punto concreto de la galería de donde extraer el bloque.

Las herramientas a emplear son simples y convencionales, Figura 55, siendo este otro punto a favor para realizar la tentativa.



Figura 55. Herramientas empleadas en el intento de extracción de un bloque pseudo-ortogonal a) taladro rotopercutor b) sierra de sable con hoja de 27 cm de longitud

Con esta finalidad se hace una tentativa de extracción de un bloque del paramento consistente en la perforación de 12 taladros regularmente espaciados en un contorno de 25 x 25 cm, recortando los espacios entre taladros con una sierra de sable, Figura 56.

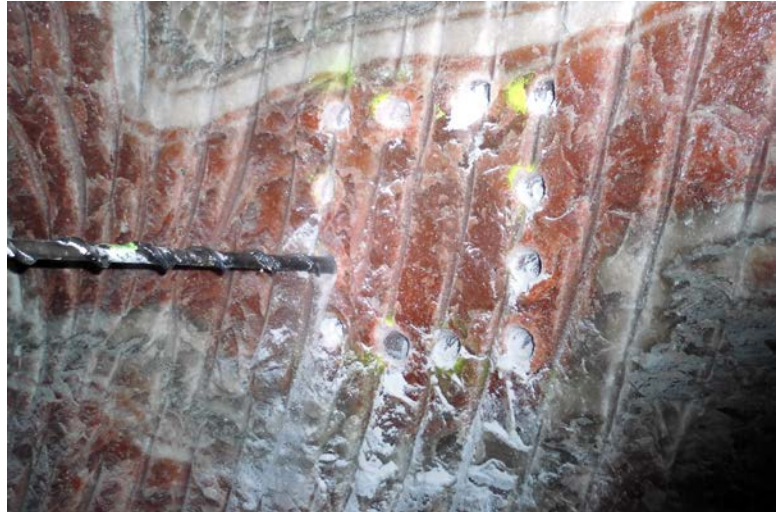
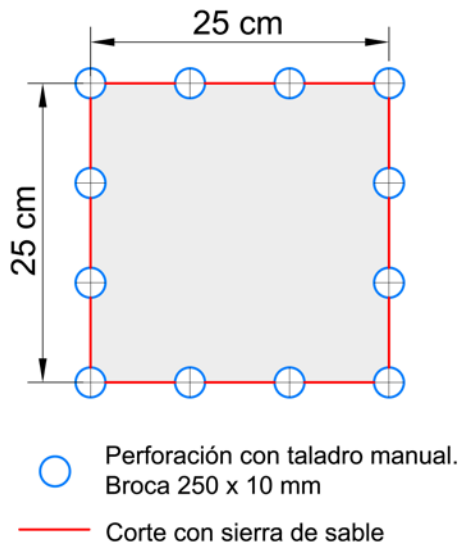


Figura 56. Esquema de la perforación con taladros y cortes para independizar y extraer un bloque pseudo-ortogonal del macizo rocoso

En principio el bloque así perforado y cortado debería quedar independizado del macizo rocoso excepto por la cara opuesta a la de la galería. Mediante el empleo de cuñas y palancas se esperaba poder romper esta unión y extraer el bloque, pero después de muchos esfuerzos no se logra. Posiblemente los taladros están desviados unos respecto otros al perforarse de forma manual y queden puentes de roca sin cortar entre el macizo y la muestra. La prueba finaliza con un estrepitoso fracaso.

Una posible subsanación de este problema consistiría en la fabricación de un marco ligero de aluminio con una guía y deslizadera tal que previamente fijado el marco en el paramento mediante tacos de expansión, se garantizase el perfecto paralelismo entre los taladros perforados. Se mantendría la ventaja de la portabilidad de los equipos y la extracción selectiva. Por motivos de tiempo y coste no se ha hecho ninguna tentativa en este sentido.

- e) Extracción de muestra cilíndrica del paramento mediante máquina de taladro con diamante.

Los equipos de corte con corona de diamante tipo “Hilti”, como el mostrado en la Figura 47, son equipos muy utilizados para el corte de rocas y hormigón. El principal problema que se presenta es como evitar el uso de agua para la refrigeración y extracción de detritos, que como ya hemos visto provoca problemas de disolución y degradación de las muestras. El problema se soluciona adaptando a la entrada de agua de la máquina de corte una conexión con una manguera de aire comprimido. De esta forma es posible hacer un corte en seco barriendo el detrito generado con el aire a presión. Como contrapartida hay que trasladar-disponer de un compresor en el punto de extracción de muestra, lo que añade complicación logística. Para obtener muestras de un diámetro lo más grande posible, se emplea una perforadora Hilti modelo DD-250E de 2,4 kW de potencia que admite una corona de 200 mm de diámetro. El compresor tiene 2,8 kW de potencia y un calderín de 100 litros que se muestra insuficiente para poder suministrar un caudal de aire de forma continua a la máquina de corte.

La operativa es la siguiente:

- 1) en primer lugar se ancla la columna al paramento mediante un taco de expansión y varilla roscada M10, Figura 57 a).
- 2) a continuación se monta la máquina de corte sobre la columna y se coloca la corona. Se conecta la manguera de aire comprimido y se abre la llave de paso. El equipo está listo para el inicio del corte, Figura 57 b).
- 3) mediante el timón acoplado a la unidad de avance se aplica el empuje necesario al útil de corte contra la pared. Este empuje no ha de ser excesivo dado que la refrigeración por aire no es muy efectiva. Cuando se ha logrado introducir toda la corona se da la perforación por finalizada, Figura 57 c).

- 4) con la ayuda de un destornillador se hace ligera palanca sobre la muestra y se produce la rotura de la misma por el fondo, quedando totalmente independizada del macizo rocoso Figura 57 d). Se extrae la muestra con cuidado, Figura 57 e).

- 5) Una vez extraída la muestra se etiqueta y se empaqueta con plástico de burbujas para protegerla de golpes, Figura 57 f). Las longitudes obtenidas son algo inferiores a las de la corona de corte, que tiene 40 cm de longitud. Las muestras tienen una longitud de entre 34 y 36 cm, lo que permiten obtener de cada una de ellas dos probetas para el ensayo WST de 15 cm de profundidad.



Figura 57. Proceso de extracción de muestra cilíndrica de $\varnothing 200$ mm. a) anclaje de la columna al paramento mediante taco de expansión. b) y c) proceso de corte aplicando empuje con el timón. La evacuación del detrito de corte se realiza con aire comprimido d) aplicación de fuerza palanca con un destornillador para romper el ligazón del fondo del taladro. e) y f) extracción y empaquetamiento de la muestra.

En la Figura 58 se muestra una imagen de conjunto de la operación. Comentar que el uso de aire comprimido como fluido de evacuación de detritos genera una nube de polvo salino alrededor de la zona de trabajo.



Figura 58. Vista de conjunto de la operación de extracción de muestra cilíndrica.

Sobre los testigos en bruto así obtenidos deben realizarse unos cortes adicionales para obtener finalmente las probetas de 15 cm de longitud requeridas para los ensayos WST. Para ello se cortan y eliminan las caras irregulares de los dos extremos del cilindro y se da un corte suplementario en la muestra para crear una superficie plana de 140 mm de anchura, Figura 59, quedando la probeta lista para los cortes de precisión que se harán con la sierra de banda del laboratorio.

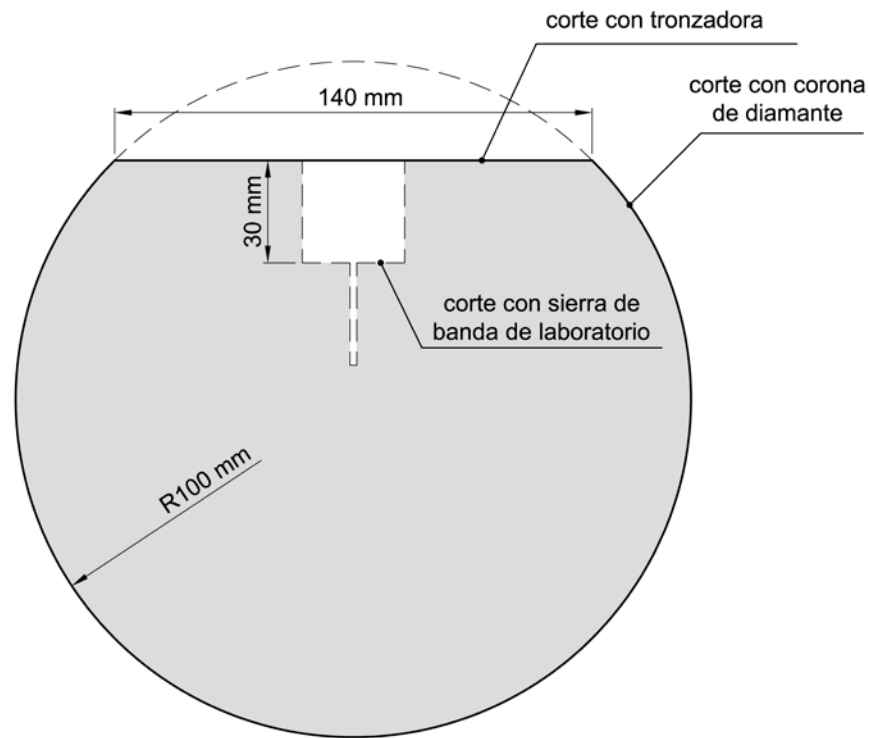


Figura 59. Cortes requeridos para la formación de un testigo apto para el ensayo WST.

Con la experiencia previa adquirida en el uso de la tronadora con sierra de cinta, se llevan las muestras cilíndricas al taller para ejecutar estos cortes adicionales. El resultado final es la probeta mostrada en la Figura 61, lista para ser cortada la muesca superior de tres por tres centímetros y el corte de entalladuras para el inicio y guiado del plano de fractura con la sierra del laboratorio.



Figura 60. Cortes adicionales con tronadora

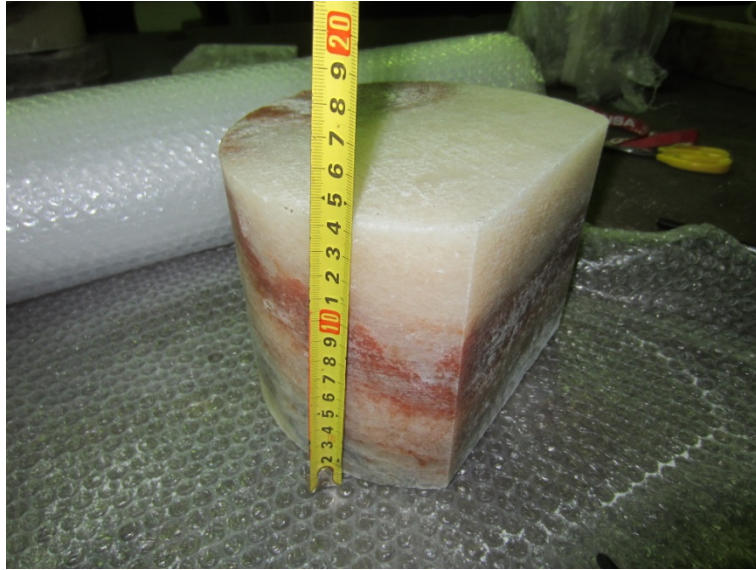


Figura 61. Testigo final obtenido listo para recibir los cortes de creación de muesca y entalla de guiado de fractura con la sierra del laboratorio.

Después de todos los intentos y métodos utilizados, la alternativa que mejor resultado ha dado ha sido la extracción de muestra cilíndrica del paramento mediante máquina de taladro con diamante y la realización de cortes adicionales con tronzadora. En conjunto es un proceso lento y laborioso pero que ha demostrado su aplicabilidad para la obtención selectiva de testigos de rocas salinas aptos para ser ensayados mediante WST.

Poco antes del inicio de los ensayos surge la posibilidad de disponer de gran cantidad de muestras cúbicas de halita de 15 cm de arista facilitadas por la empresa explotadora del yacimiento de Cardona Figura 62. Estas muestras se habían extraído y preparado con fines comerciales para el sector ganadero, pero al no prosperar la operación son ofrecidas por la empresa para la finalidad de este trabajo. A partir de este momento se focaliza el presente TFM en el estudio de la halita, dejando en segundo plano el de la silvinita con la única muestra obtenida.



Figura 62. Muestras cúbicas de sal facilitadas por la empresa explotadora del yacimiento de Cardona.

La halita de Cardona se presenta como una roca dura y compacta con sombreados blancos y grises. Ocasionalmente se observa un sutil bandeado formado por zonas más oscuras, aunque no puede decirse que se trate de una estructura estratificada ni de un plano de discontinuidad.

Si retro-iluminamos una muestra de poco grosor se observan mejor estas heterogeneidades en el seno de la roca, como se muestra en la Figura 63.

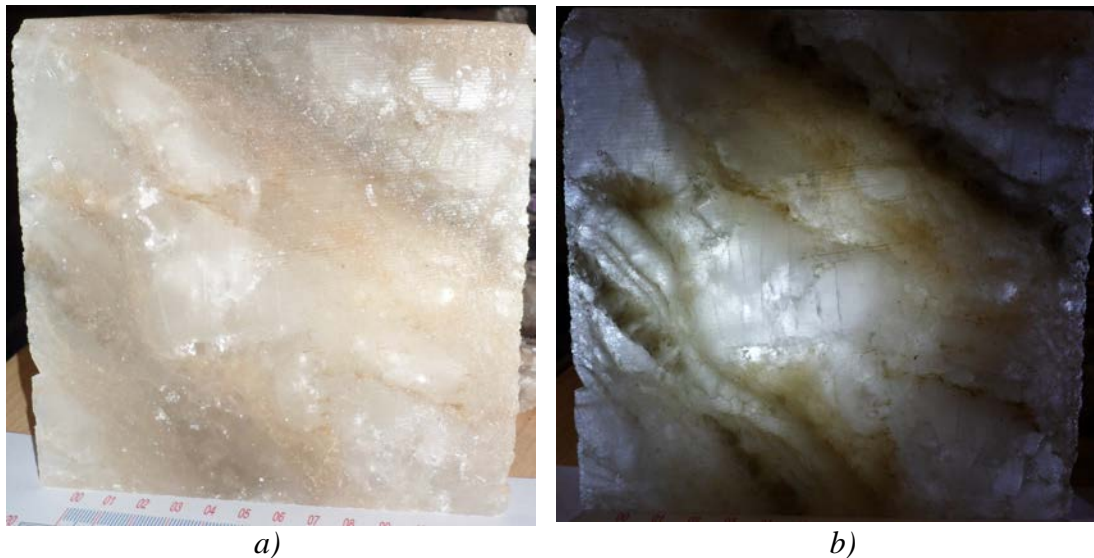


Figura 63. a) halita con iluminación frontal, b) misma muestra retro-iluminada. El grosor de la lámina es de 2 cm.

Durante la manipulación y el tallado de muescas los testigos se han comportado de manera homogénea, no produciéndose ninguna rotura ni despegue por estas zonas bandeadas. A pesar de ello, la entalla de inicio de fractura se ha intentado situar perpendicularmente a estos bandeados para evitar al máximo la posible anisotropía frente a la fractura que estas impurezas puedan conferir. Como se verá en el apartado de resultados experimentales, se ha descartado un ensayo por la influencia del bandeo en el plano de fractura.

Una inspección visual de los especímenes muestra que el tamaño de los cristales varía desde pocos milímetros hasta dos centímetros e incluso más, presentando, pues, una dispersión de tamaños de grano, Figura 64. Se observan granos de gran tamaño rodeados por zonas de grano más fino.

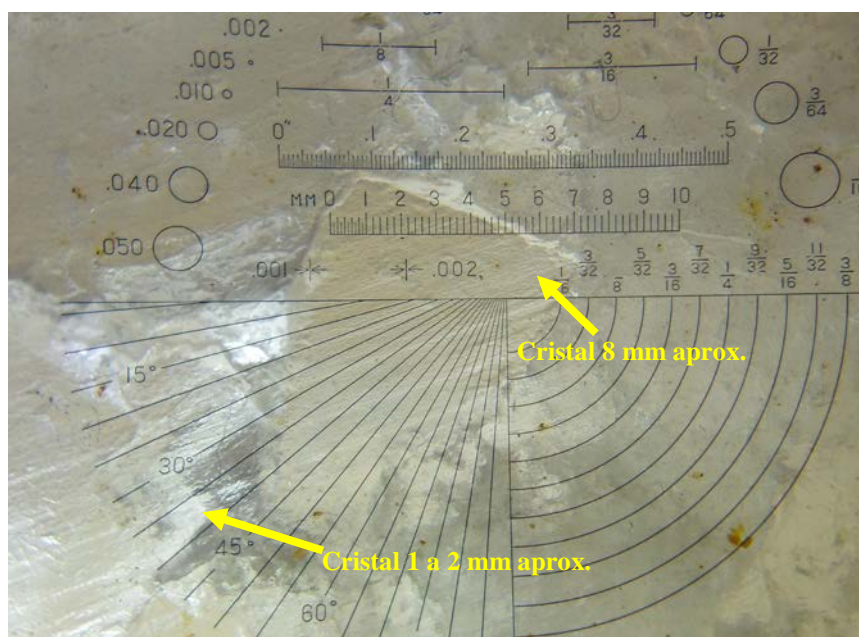


Figura 64. Cristales de halita observados mediante lupa graduada.

4.1.4 Preparación de las muestras

La preparación de las muestras consiste en el serrado de la acanaladura superior de tres por tres centímetros y el corte de entalladuras para el inicio y guiado del plano de fractura. En la Figura 65 se muestra la geometría y dimensiones nominales de una probeta-tipo. Debido a la imprecisión de los cortes estas dimensiones varían unos pocos milímetros. De cada muestra ensayada se han medido sus dimensiones exactas reales.

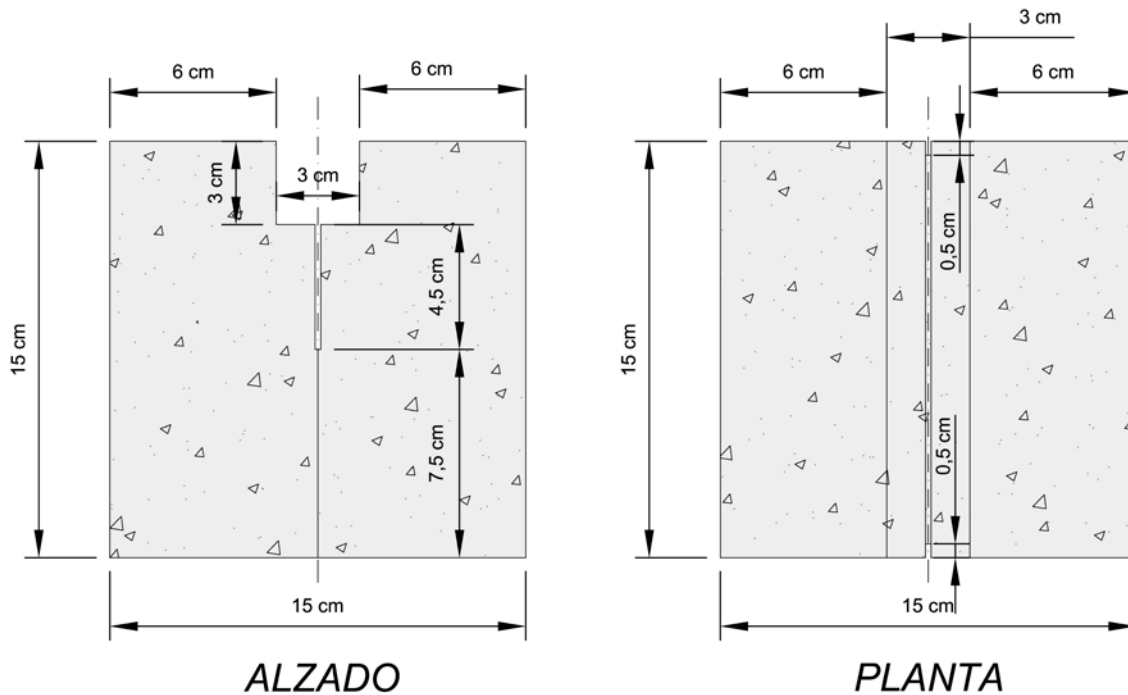


Figura 65. Geometría nominal del espécimen empleado en los ensayos WST (dimensiones en cm).

Para el serrado de acanaladuras y muescas se ha empleado una sierra de banda del laboratorio de mecánica de rocas de la UPC-ETSECCPB, marca DRAMET, el equipo se muestra en la Figura 66. El equipo cuenta con un sistema de refrigeración mediante agua para la sierra adiamantada. Dada la naturaleza muy soluble de la roca a cortar no se ha empleado el sistema de refrigeración. A pesar de ello no se ha producido ningún problema de sobrecalentamiento ni degradación de los diamantes debido a la poca dureza de la roca y a su carácter no abrasivo. La única precaución observada ha sido no superar la velocidad de giro de la banda en 700 rpm.

La mesa de corte tiene cierta inclinación hacia la sierra y va montada sobre una deslizadera. Este sistema hace que la muestra siempre tenga un empuje suave y constante contra la banda de corte debido a su propio peso.



Figura 66. Equipo de corte mediante sierra de banda. Laboratorio de mecánica de rocas ETSECCPB-UPC.

Antes de realizar los cortes éstos se marcan mediante rotulador indeleble (Figura 68 a). También facilita la tarea seleccionar una cara de apoyo sobre la mesa de corte que presente una superficie regular y sea perpendicular respecto al plano de corte.

Se ha procurado realizar la muesca de encaje de los soportes de rodamientos de tal forma que la zona de fractura quede en una zona lo más homogénea posible de la muestra, tal y como se muestra en la Figura 67.

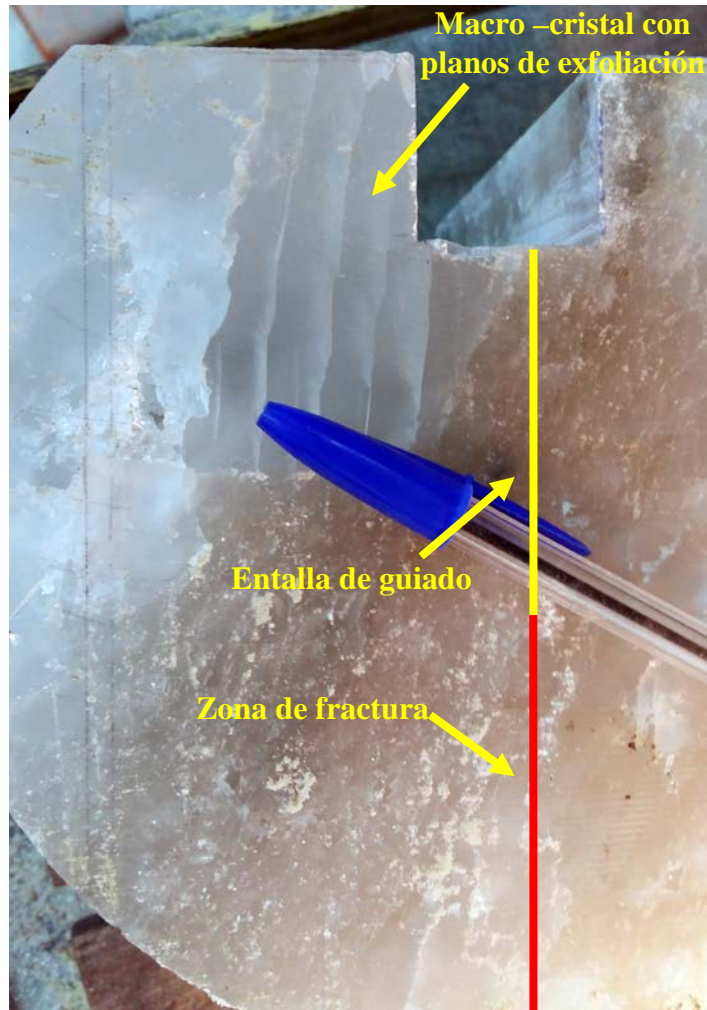


Figura 67. La zona de fractura debe situarse en una zona que sea lo más homogénea posible para evitar la influencia de las imperfecciones de la muestra.

Una vez creados los cortes necesarios Figura 68 b) - e), se adhieren en la acanaladura superior los ángulos de acero con los rodamientos sobre los que actuará la cuña. Para ello se emplea una resina epoxi bi-componente de curado rápido Figura 68 f). Dichos ángulos también van provistos en ambos extremos de sendos soportes para colocar los transductores LVDT que nos permiten medir el COD, Figura 68 g). El empleo de dos LVDT para la medición del COD da más fiabilidad dado que en caso de fallo de uno de ellos, seguimos teniendo lecturas del otro, y además podemos promediar ambas lecturas.

La Figura 68 h) corresponde a la muestra instrumentada y colocada sobre la prensa antes de iniciarse el ensayo.

El tiempo total que se dedica a la preparación de laboratorio de cada muestra es de unas 8 horas. Este tiempo se emplea en las tareas de marcaje, corte y pegado de los ángulos que tienen los rodillos de aplicación de fuerza. A este tiempo deben sumarse unas 24 h para que la resina epoxi adquiriera su máxima resistencia. Una vez finalizado el ensayo deben limpiarse y poner a punto los ángulos para volver a ser pegados.

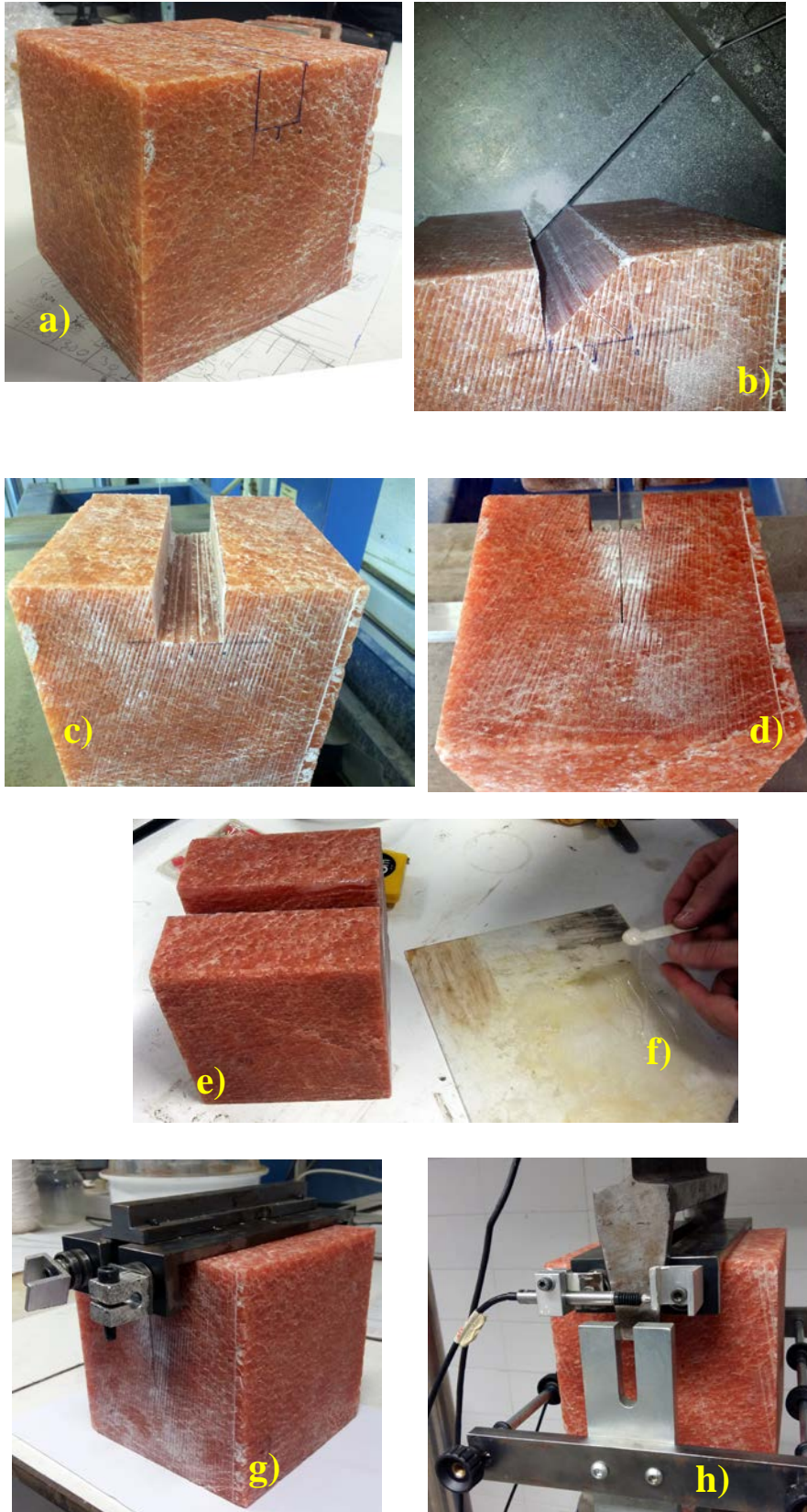


Figura 68. Operaciones de preparación de la muestra consistente en el serrado de muescas y pegado de los ángulos con los rodamientos de empuje. La imagen h) corresponde a la muestra a punto de iniciar el ensayo.

4.1.5 Equipos empleados

4.1.5.1 Cuñas

Son el elemento mecánico que aplica la fuerza de separación a la muestra. Se poseen dos juegos de cuñas con ángulos de $8,5^\circ$ y 15° para poder disponer de más o menos recorrido del plato de carga. Estas cuñas están unidas a la viga de aplicación de carga mediante tornillería, por lo que se puede cambiar rápidamente la configuración del ensayo con uno u otro tipo de cuña. En la Figura 69 se muestra el conjunto viga-cuñas ensamblado. Sus dimensiones se muestran en la Figura 70.



Figura 69. Conjunto de aplicación de fuerza viga-cuñas ensamblado

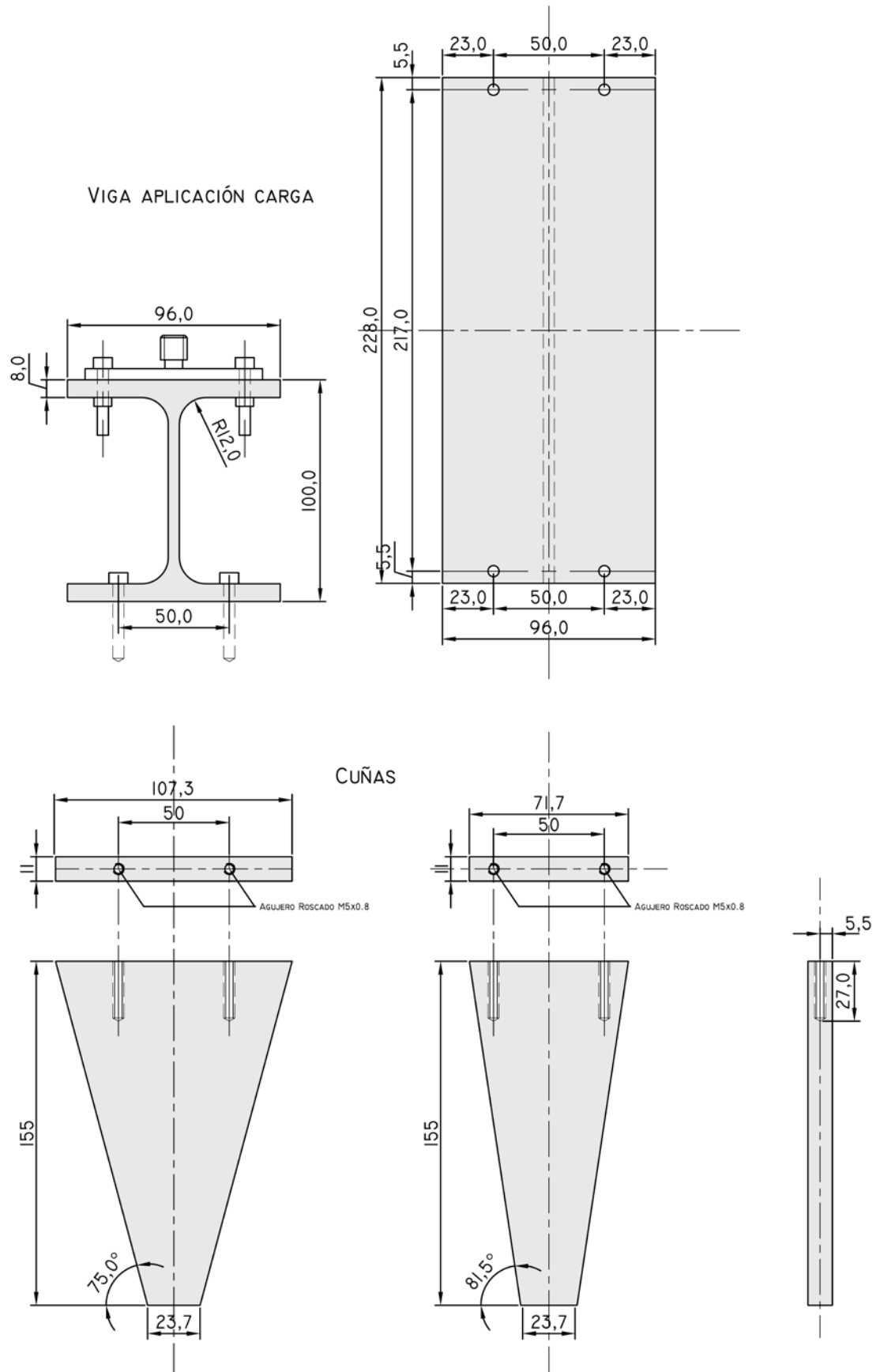


Figura 70. Dimensiones de las cuñas empleadas en el ensayo WST (medidas en mm)

4.1.5.2 Prensa

Un requisito indispensable en este trabajo es que la velocidad de aplicación del desplazamiento sea constante y pueda variarse fácilmente entre ensayos para observar su influencia en los parámetros de fractura.

El equipo empleado y que cumple con estos requisitos es una prensa digital “*ELE International*” *Digital Tritest*, que permite la regulación de la velocidad de subida del plato desde un valor mínimo de 0,02 mm/min hasta los 10 mm/min.

El rango de velocidad de COD que se corresponde con las cuñas empleadas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidad de COD (mm/min) en función de los ángulos de las cuñas empleadas y de la velocidad de subida del plato de la prensa.

Ángulo de las cuñas empleadas		
Velocidad subida plato de prensa (mm/min)	8,5°	15°
0,02	0,006	0,011
2,00	0,6	1,07

La capacidad máxima de carga de la prensa es de 50 kN, muy por encima de los valores máximos resultantes de la modelización numérica previa realizada. La fuerza aplicada se genera mediante un gato de husillo de bolas accionado por un motor eléctrico a través de los engranajes de una caja de cambios.

4.1.5.3 Instrumentación

El conjunto está instrumentado con una célula de carga UtilCell 610 de 25 kN, error $< \pm 0,017\%$, con un amplificador acondicionador de la señal Krenel CEL/M010. Para medir los desplazamientos se utilizan tres transductores LVDT modelo RDP GT2500, $\pm 2,5$ mm (error lineal $< \pm 0,1\%$), con amplificador acondicionador de señal RDP S7 AC, dos para medición de COD y el tercero para medición de la velocidad de subida del plato de carga.

La unidad de adquisición de datos *ELE* tiene cuatro canales y se puede programar el intervalo regular de grabaciones de lecturas con una frecuencia máxima de una lectura por segundo.

Previo a la realización de los ensayos se ha calibrado tanto la celda de carga como los transductores LVDT.

El esquema de conexión se muestra en la Figura 71.

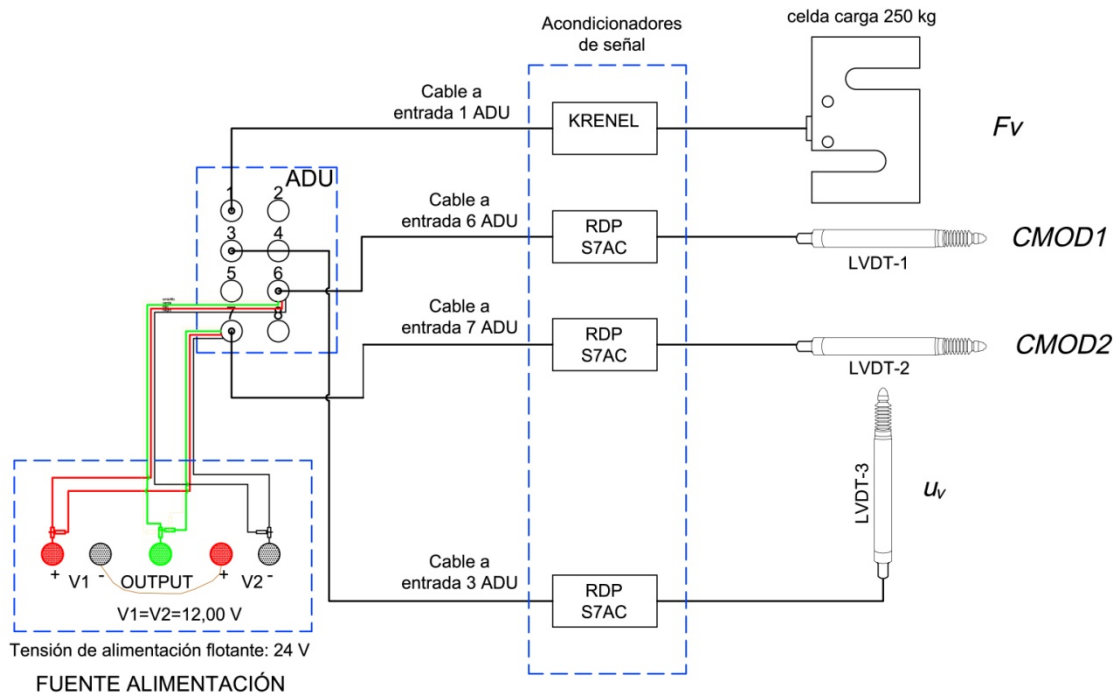


Figura 71. Esquema de conexión de instrumentación para ensayo WST.

En la Figura 72 se muestra el conjunto de todo el equipo listo para iniciar un ensayo.

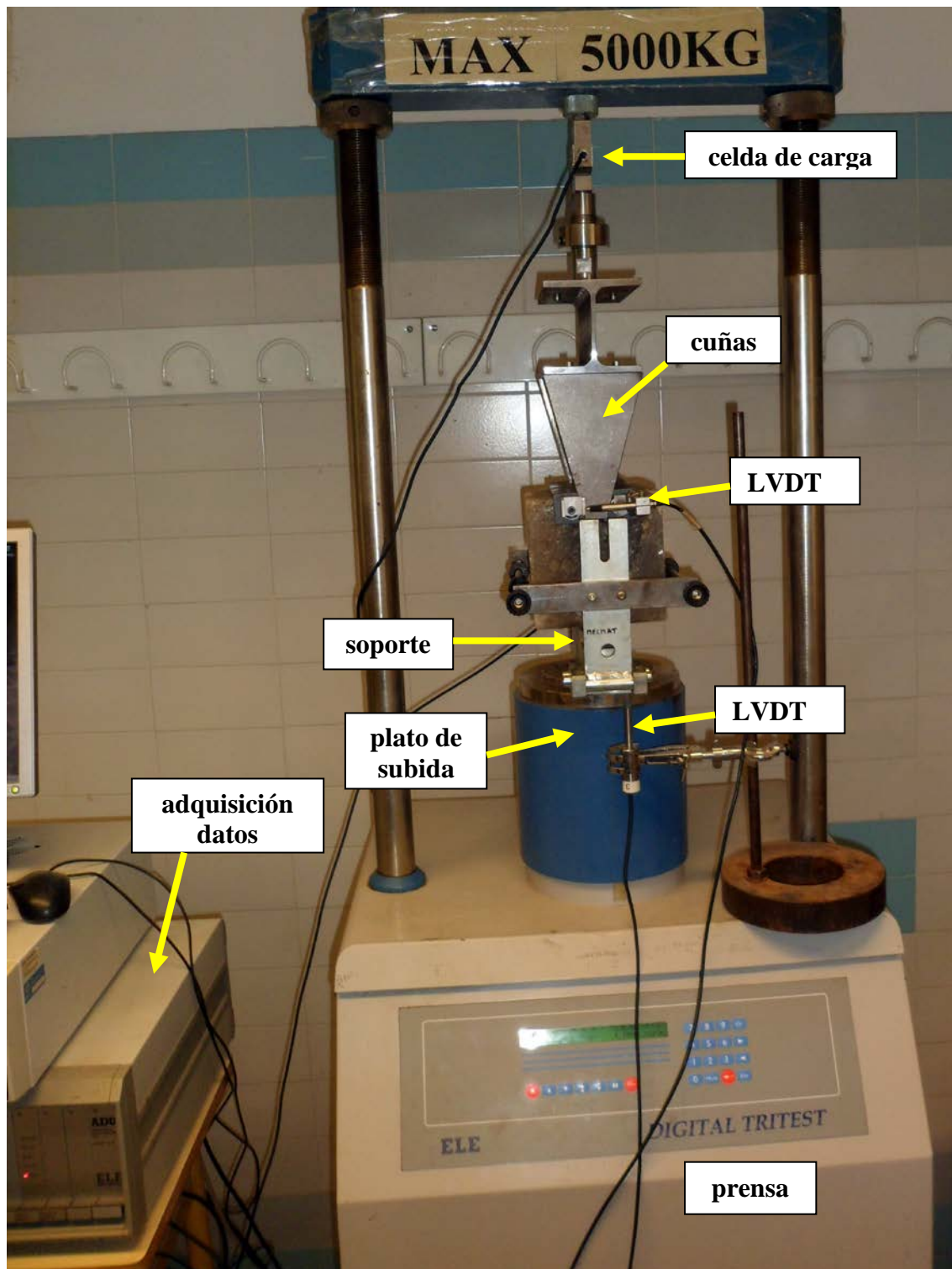


Figura 72. Conjunto del equipo listo para el inicio del ensayo WST

4.1.6 Ejecución del ensayo

Los pasos seguidos para la ejecución de cada ensayo han sido:

- 1- Colocación del soporte de la muestra sobre el plato de subida de carga. Este soporte dispone de dos espárragos laterales con unas pequeñas ruedas para sujetar la muestra mientras se prepara el ensayo, Figura 73.
- 2- Presentación de la muestra sobre el soporte sujetándola con los espárragos laterales. Se comprueba la correcta alineación y centrado de la muestra sobre el plato de la prensa.



Figura 73. Soporte de la muestra sobre el plato de subida de la prensa

- 3- Sujeción de LVDT's a los soportes mediante tornillos allen. Conexión a la unidad de adquisición de datos de todos los sensores. Comprobación del recorrido de los LVDT's. Comprobación de celda de carga.
- 4- Aplicación de una precarga con subida manual del plato de prensa y liberación de los espárragos laterales de sujeción.
- 5- Último chequeo general de todos los componentes, alineación de muestra, funcionamiento de sensores, comprobación de la velocidad programada de subida de plato de prensa, frecuencia de adquisición, etc. La Figura 74 muestra el equipo listo para el inicio del ensayo.

- 6- Inicio de adquisición de datos e inicio de ensayo. El diagrama COD-fuerza vertical se determina mediante medición y registro continuo de los correspondientes valores de la carga vertical F_v y COD. La frecuencia de adquisición de datos varía entre 1 lectura cada segundo para los ensayos a mayor velocidad a 1 lectura cada 30 segundos en los más lentos. Para que el ensayo sea válido, se requiere que la respuesta COD-fuerza vertical sea estable, es decir, que la curva correspondiente no muestre “snap-back”.
- 7- Finalización del ensayo cuando la muestra ha roto totalmente en dos mitades.
- 8- Medición con precisión el ancho y largo del área de ligazón de las dos mitades de la fractura. Esta área está representada en la Figura 36.
- 9- Limpieza de los restos adheridos a los ángulos de aplicación de fuerza y pegado a una nueva muestra.

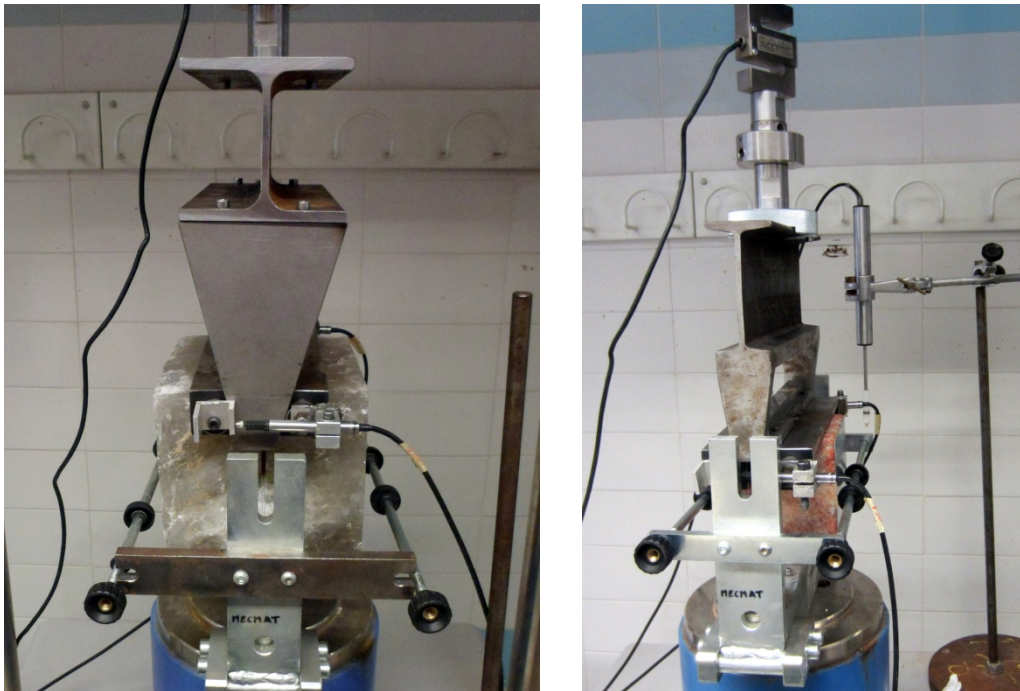


Figura 74. Equipo listo para inicio de ensayo WST con cuñas de distinto ángulo.

Al tiempo empleado de preparación de laboratorio para cada muestra debe sumarse el tiempo de ejecución de los ensayos, que para los de velocidad más lenta se han llegado a superar las 40 h por ensayo.

4.2 Ensayos de fluencia (*creep*)

La finalidad del ensayo de fluencia es poder determinar las deformaciones diferidas en el tiempo de una probeta convencional (prismática o cilíndrica) de la misma roca, sometida a un estado de compresión uniforme y constante. Con los datos obtenidos de los ensayos es posible calcular los parámetros de una ley de tipo potencial que mejor se ajusten al fenómeno de la fluencia del material roca considerado como continuo. El objetivo final será la obtención de los parámetros de una cadena de Maxwell de siete elementos. Este modelo reológico está implementado en el código de elementos finitos DRAC [14] y permite la modelización del continuo visco-elasticamente.

4.2.1 Ley potencial

Las curvas de deformación por fluencia (ε_c)-tiempo (t) se pueden intentar reproducir mediante expresiones de tipo potencial, ecuación (4.1), [8]:

$$\varepsilon_c = K \sigma_e^m t^n \quad 4.1$$

dónde:

ε_c = deformación por fluencia.

K =constante (si la temperatura es constante)

σ_e =Tensión equivalente de Von Mises, también llamada *tensión efectiva* en un estado tensional 2D, ($\sigma_1, \sigma_2=\sigma_3$), $\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3$

t = tiempo

n = exponente de tiempo, <1

m = exponente de tensiones, en el rango 1-7

En nuestro caso, dado que queremos obtener unos parámetros de viscoelasticidad lineal, el exponente de tensiones será $m=1$ y tenemos:

$$\varepsilon_c(t) = K \sigma_e t^n \quad 4.2$$

K = constante de unidades $[\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-n}]$

Si la tensión aplicada es constante, la ecuación (4.2) se transforma en:

$$\varepsilon_c(t) = Bt^n \quad 4.3$$

Dónde:

B = es una constante, (si temperatura y tensión son constantes), unidades $[s^{-n}]$

t = tiempo

n = exponente de tiempo, <1

Ajustando los datos experimentales con una curva potencial como la de la ecuación (4.3), y conociendo la tensión aplicada al ensayo, se deducen fácilmente las constantes K y n de la ecuación (4.2), objetivo de estos ensayos.

Para hacer el ajuste correctamente hay que tener en cuenta que el ensayo de fluencia nos proporciona las deformaciones totales instantánea y diferida. La deformación total en un instante t será la suma de la deformación elástica inicial y la deformación diferida o fluencia, esto es:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(t) \quad 4.4$$

Por tanto, para ajustar la curva de fluencia debemos utilizar solo las deformaciones diferidas en el tiempo, o sea:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_0 \quad 4.5$$

Conociendo la longitud inicial de la probeta, l_0 , las deformaciones totales se obtienen a partir de:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad 4.6$$

La ecuación (4.4) puede representarse gráficamente según la Figura 75.

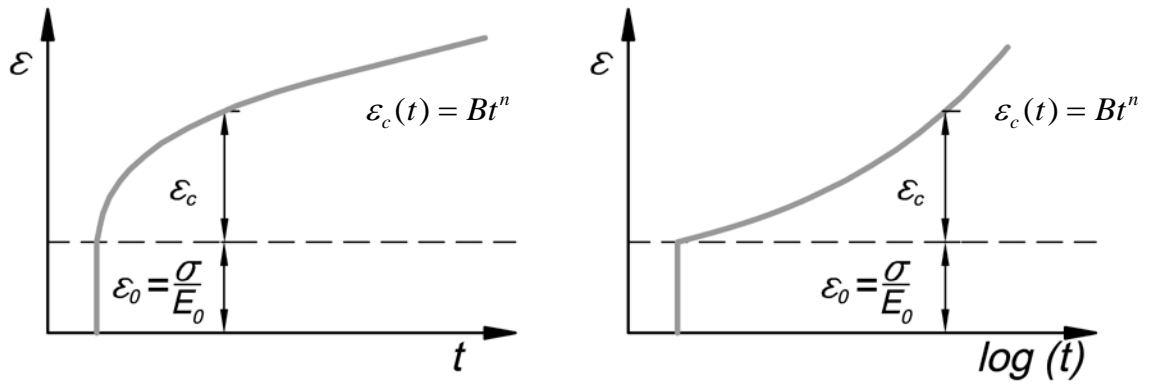


Figura 75. Izquierda: gráfica deformación-tiempo con indicación de la deformación instantánea (ε_0) y deformación por fluencia (ε_c). Derecha: Ídem con el tiempo representado a escala logarítmica.

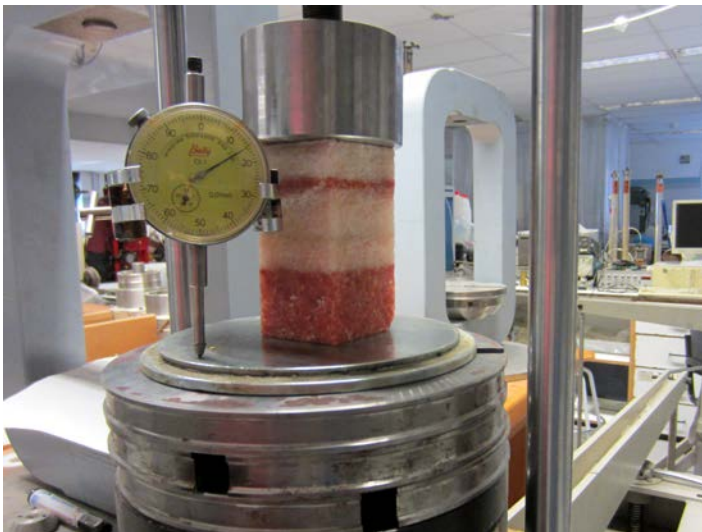
4.2.2 Equipos

Los ensayos de fluencia se han realizado en un banco edométrico. Este equipo nos permite mantener constante en el tiempo la tensión aplicada sobre la muestra mediante el conjunto de pesos colocados en el extremo del brazo de palanca con una multiplicación de 1:20 respecto el peso colocado en la varilla porta-pesos.

En total se han realizado nueve ensayos de fluencia con dos duraciones diferentes:

- Tres ensayos con una duración de tres meses aproximadamente, con lecturas manuales de reloj comparador.
- Seis ensayos con una duración de una semana y adquisición automática de lecturas mediante LVDT.

En la Figura 76 se muestran los dos sistemas de adquisición de datos empleados.



a)



b)

Figura 76. Ensayos de fluencia, a) con reloj comparador y lectura manual, b) con LVDT y adquisición automática de lecturas.

4.2.3 Muestras

Se han utilizado dos tipos de muestras:

Silvinita: prismáticas de $5,05 \times 5$ cm de base y 8 cm de altura, obtenidas a partir del tallado de la muestra de este mismo mineral sometida a ensayo WST.

Halita: cilíndricas de 5 cm diámetro y entre 9,6 y 12,3 cm de altura, obtenidas de sondeos de reconocimiento que realiza la empresa explotadora del yacimiento en Súa.

4.3 Ensayo de compresión simple

4.3.1 Descripción y equipos

El objetivo de este ensayo es conocer el valor de resistencia a compresión simple de la roca y poder disponer del módulo tangente inicial para poder calcular la deformación instantánea en los ensayos de fluencia.

Se ha utilizado la misma prensa con control de desplazamiento empleada en los ensayos WST y descrita en el apartado 4.1.5.2. La instrumentación para registrar el desplazamiento (LVDT's) también es la misma que la empleada en los ensayos WST. La única variación ha sido la célula de carga que se ha sustituido por una de mayor capacidad, UtilCell 650 de 75 kN. La Figura 77 muestra el equipo preparado para iniciar un ensayo.

4.3.2 Muestras

Se ha ensayado una muestra prismática de 4x4 cm de base y 8 cm de altura (esbeltez 1:2) obtenida a partir del tallado de la muestra de roca salina sometida a ensayo WST.

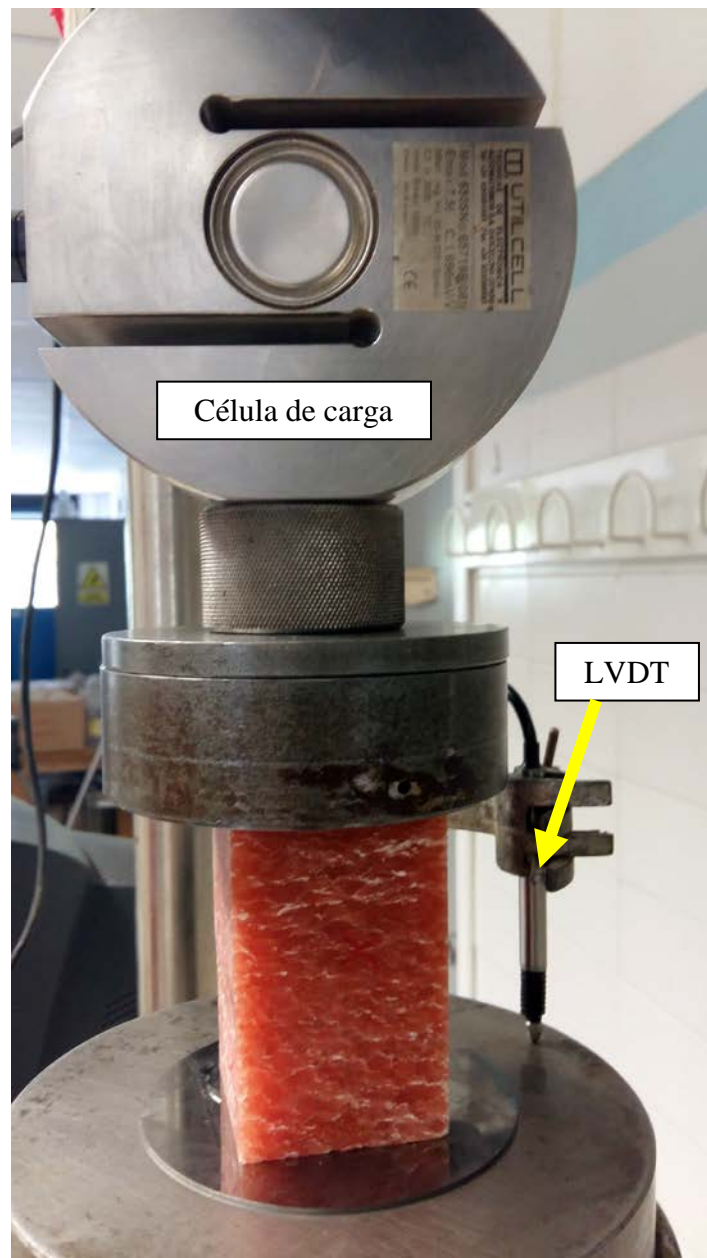


Figura 77. Ensayo de compresión simple

5 Modelización numérica previa

Previo a la ejecución de los ensayos, se ha realizado una serie de simulaciones numéricas mediante el código de elementos finitos DRAC [14] desarrollado por el grupo de investigación MECMAT (UPC).

Este código, que se ha utilizado con éxito en distintas ocasiones para simular el comportamiento mecánico de distintos materiales cuasi-frágiles, tales como rocas y hormigón, e.g. [1], [2], [13], [36], [38]. Estas simulaciones se realizaron con dos objetivos. Por un lado, optimizar la configuración de los dispositivos y protocolos a utilizar en los ensayos experimentales. Y por el otro, hacer una estimación de los resultados a obtener en los ensayos experimentales en base a las hipótesis iniciales sobre el comportamiento combinado de fluencia y fractura.

5.1 Descripción del modelo

La geometría del modelo y la malla de elementos finitos utilizada se muestra en la Figura 78, donde los elementos verdes representan silvinita, los elementos magenta representan el acero de los platos de carga y los elementos grises representan un “muelle equivalente” para tener en cuenta la rigidez de la prensa y los demás dispositivos mecánicos intercalados. Los elementos que representan las placas de acero y el muelle equivalente tienen una ley constitutiva elástica lineal, mientras que los elementos que representan la roca tienen una ley constitutiva visco-elástica. La zona por donde debe propagarse la fractura se ha modelizado mediante elementos junta de espesor nulo (*zero-thickness elements*) que se indican mediante una línea gruesa azul. Estos elementos están equipados con una ley constitutiva basada en un modelo de fractura normal/cortante en materiales cuasi-frágiles, independiente del tiempo [36]. Las simulaciones se realizan bajo la hipótesis de tensión plana.

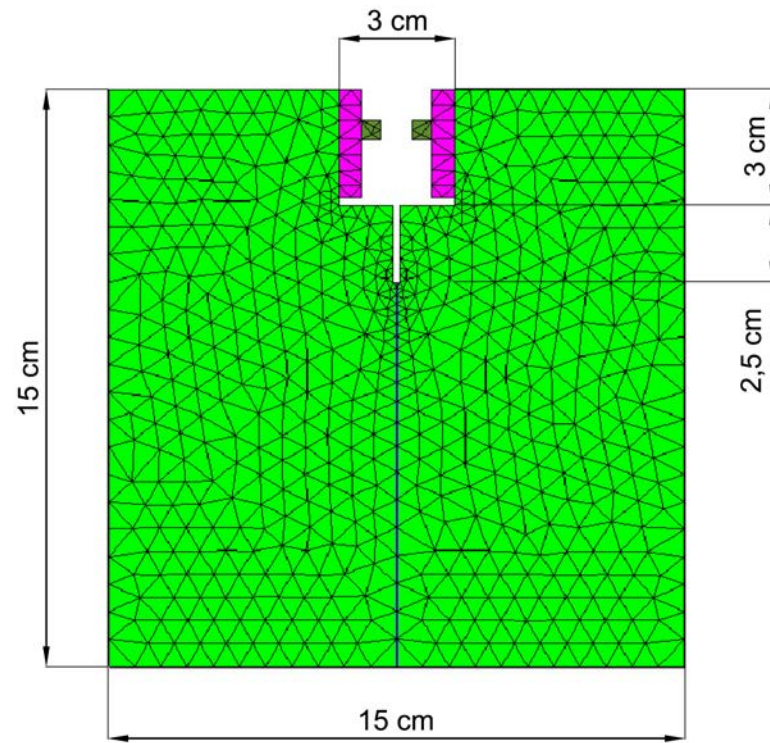


Figura 78. Geometría del modelo y malla de elementos finitos.

5.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades mecánicas de los diferentes elementos que componen el modelo se dan en los siguientes sub-apartados.

5.2.1 Parámetros constitutivos del medio continuo.

Los parámetros elásticos asignados a los elementos que forman el medio continuo se dan en la Tabla 2. Los parámetros del muelle equivalente se obtuvieron de un estudio anterior realizado por Liaudat et al. [2].

Tabla 2. Parámetros elásticos del medio continuo

CONTINUO	E (MPa)	ν	Modelo constitutivo
Silvinita	930	0,14	Visco-elástico (Law 4)
Acero placa	200.000	0,30	Elástico lineal (Law 1)
Muelle equivalente (rigidez prensa)	360	0,30	Elástico lineal (Law 1)

Ajuste de valores de cadena Maxwell:

El comportamiento visco-elástico del continuo está definido por una cadena de Maxwell [13] de siete elementos con los valores dados en la Tabla 3. Para obtener los valores de los módulos elásticos que mejor se ajustan a los resultados experimentales de fluencia (ver sección 4.2), se ha utilizado un programa desarrollado también dentro del grupo de investigación MECMAT, basado en el procedimiento propuesto por Bazant [37]. El código ofrece la posibilidad que el usuario defina cualquier tipo de función de fluencia $J(t)$. En nuestro caso, se ha utilizado la obtenida ajustando los datos experimentales:

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + Bt^n$$

A partir de esta función definida por el usuario, el código calcula valores discretos de la función de relajación.

El resultado último que obtenemos es la matriz de valores discretos de los módulos de la cadena de Maxwell para varias edades. En nuestro caso concreto, dado que la sal y potasa no tienen envejecimiento a nuestra escala temporal de trabajo, y la función de fluencia definida solo es función del tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga, $J(t, t') = J(t)$, los valores de los módulos de la cadena son idénticos para distintas edades. Esta matriz de valores se utiliza posteriormente como input para caracterizar la fluencia en el código de elementos finitos DRAC. Tal y como ya se ha expuesto en el Capítulo 2, la ventaja que ofrece trabajar con el modelo de cadena es que evitamos el almacenamiento del historial de tensiones y deformaciones que serían necesarias para resolver las integrales hereditarias, aumentando de esta manera la eficiencia computacional.

Tabla 3. Módulos elásticos de cadena de Maxwell

t_{ref} (s)	EMU (MPa)
30	52.0452562
300	44.2255685
3000	69.4960324
30000	90.2781283
300000	104.935795
3000000	166.592023
1E+31	632.249018

Rango validez modelo t=30 s. hasta t=3.000.000 s.

5.2.2 Parámetros constitutivos de los elementos junta

En la Tabla 4 se muestran los valores de los parámetros utilizados para la ley constitutiva de los elementos junta utilizados para representar la zona de fractura. Los parámetros correspondientes al modo II de fractura se omiten en la tabla 3, pues no son relevantes para la simulación del ensayo WST. La resistencia a tracción y la energía de fractura se han estimado a partir de datos bibliográficos [8] [10].

Tabla 4. Parámetros empleados en los elementos junta

Junta 1	
Ec. Constitutiva:	Fracture Mechanics Interface (Law 5)
Rigidez normal (Kn)	1e09 MPa/m
Rigidez tangencial (Kt)	1e09 MPa/m
Xi 0	2,0 MPa
GfI	5,2e-04 MN/m
Alpha x	0

5.3 Condiciones de contorno

Se prescriben desplazamientos horizontales de $u_x = \pm 2$ mm para la abertura de la entalla, equivalente a un COD de 4 mm, y se impide el movimiento de la muestra en su punto de apoyo ($u_x = 0$, $u_y = 0$). Estas condiciones de contorno quedan reflejadas en la Figura 79.

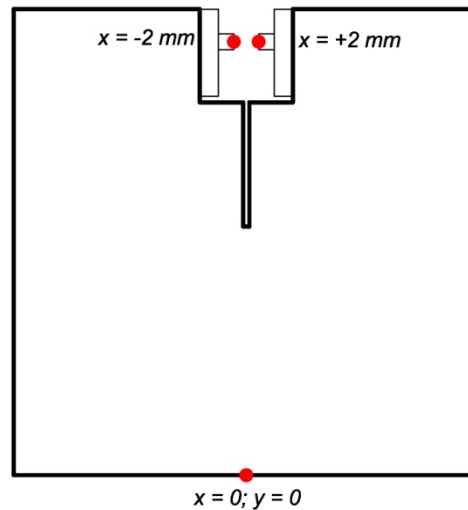


Figura 79. Condiciones de contorno impuestas al modelo

5.4 Resultados obtenidos y discusión

Se han realizado tres cálculos simulando tres duraciones del ensayo: 12 h, 120 h y 1200 h, que equivalen a velocidades de COD de $5,6 \times 10^{-3}$, $5,6 \times 10^{-4}$ y $5,6 \times 10^{-5}$ mm/min

Para cada cálculo se ha graficado la fuerza de reacción en la dirección x en el nodo derecho de prescripción de desplazamiento (nodo 147).

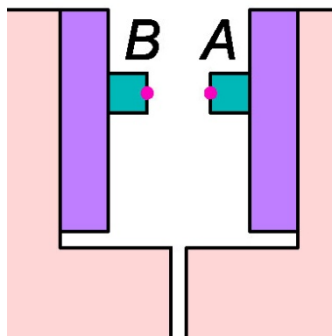


Figura 80. Puntos de medida en el modelo de la relación fuerza/desplazamiento

En la Figura 81 se grafica la fuerza horizontal aplicada en el nodo 147 (reacción al desplazamiento impuesto) versus el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.

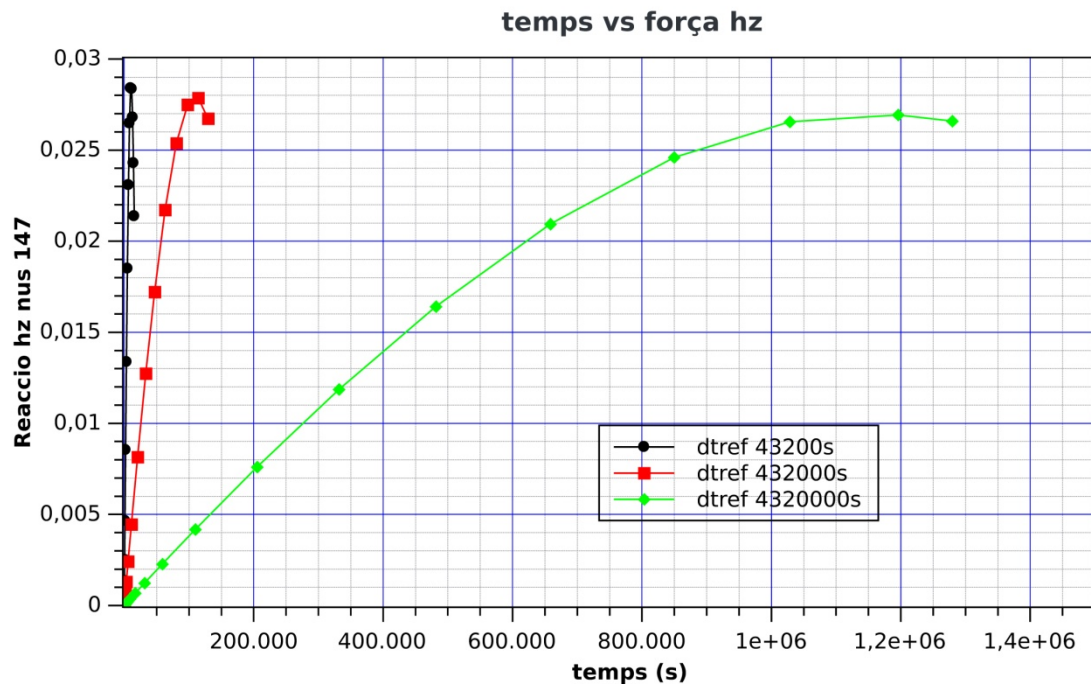


Figura 81. Fuerza aplicada (reacción al desplazamiento horizontal impuesto) en el nodo 147 versus tiempo de ensayo. La curva negra corresponde a una velocidad de COD de $5,6e-03$ mm/min, la roja a $5,6e-04$ mm/min y la verde a $5,6e-05$ mm/min.

Los valores de fuerza máxima aplicada se resumen en la Tabla 5 y se representa en función de la velocidad de COD en la Figura 82.

Tabla 5. Fuerza máxima de reacción

Tiempo [s]	dCOD/dt (mm/min)	Max. Fsp [kN]
43.200	0,0056	28,4
432.000	0,00056	27,7
4.320.000	0,000056	26,95

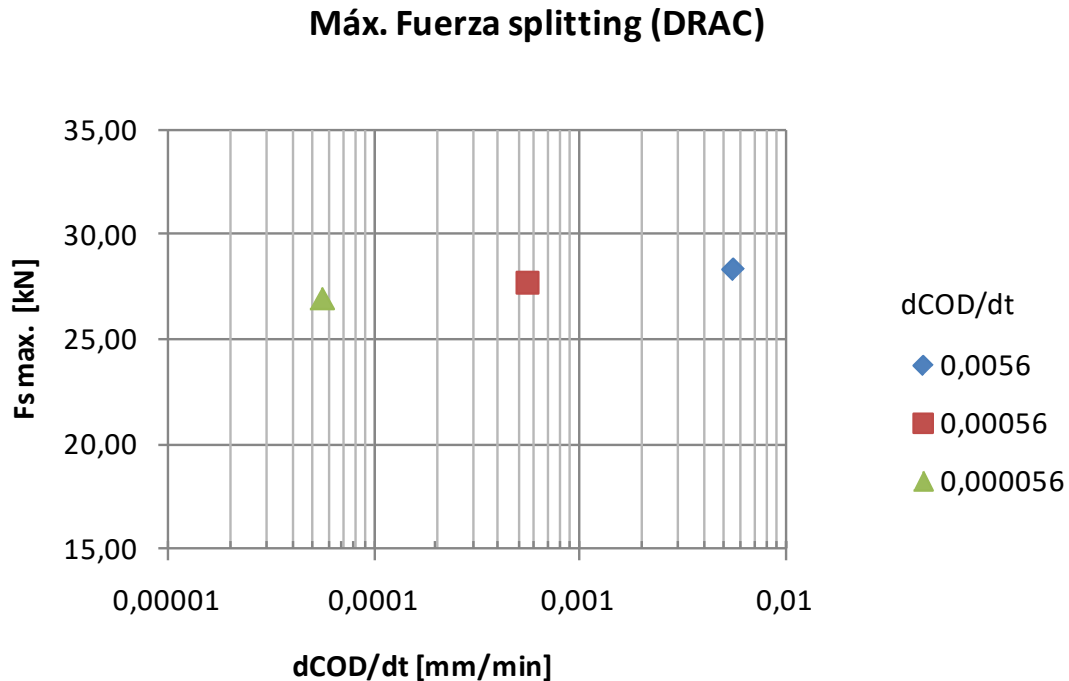


Figura 82. Fuerza máxima de reacción para distintas velocidades de COD

Los resultados muestran que la fuerza máxima crece con el aumento de la velocidad de COD y que las pendientes de la rama de ascenso disminuyen cuanto más lento es el ensayo. Los resultados también indican que el trabajo necesario para partir la probeta crece a medida que se disminuye la velocidad de COD, debido a que una parte cada vez mayor del trabajo realizado se consume en la deformación plástica (viscosa) de la roca. Estas predicciones se confirmarán más adelante de forma experimental.

Para la interpretación de estos resultados debe tenerse en cuenta que en el modelo numérico empleado solo es posible introducir la dependencia del tiempo a través de la visco-elasticidad del medio continuo, pero no en la junta, que obedece a una ley constitutiva (LC) independiente del tiempo (elasto-plástica). Como consecuencia de esta limitación, la velocidad de carga afecta poco a los valores de fuerza máxima obtenidos del modelo. Una posible futura ampliación de este trabajo es reproducir numéricamente los ensayos realizados y verificar si la ley de fractura puede ser independiente del tiempo o debería considerarse un nuevo modelo de junta con dependencia del tiempo.

6 Resultados experimentales obtenidos

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados.

6.1 Plan de ensayos

Para alcanzar los objetivos planteados en este TFM se han realizado los siguientes ensayos:

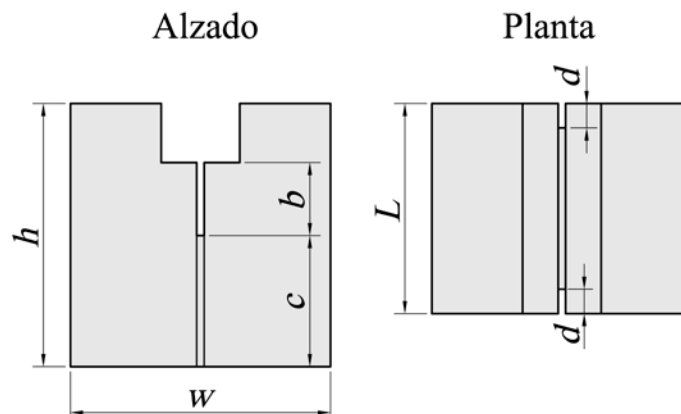
- Ensayos de Wedge Splitting Test (WST)
- Ensayos de fluencia diferida en el tiempo
- Ensayo de determinación del módulo elástico instantáneo en compresión simple.

6.1.1 Ensayos WST

El resumen de todas las probetas ensayadas se da en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de ensayos WST realizados

Id	litología	w	Dimensiones (cm) (ver esquema al pie de tabla)					v. nominal prensa (mm/min)	ángulo cuñas (°)	v. COD medido (mm/min)
			h	L	b	c	d			
0	carnalita	10	10	10	3,5	3,5	0,3	0,02	8,5	0,006
1	silvinita	14,9	15	15	6,2	5,8	0	0,02	8,5	0,006
2	silvinita	15	11,5	7,2	2,5	6	0,475	0,20	8,5	0,06
3	silvinita	15	11,75	6,5	2,5	6,25	0,5	0,07	8,5	0,021
4	silvinita	15	11,5	5,4	2,5	6	0,3	0,02	8,5	0,006
5	halita	15	15	15	4,3	7,7	0,3	2,00	8,5	0,640
6	halita	15	15	14,9	4,5	7,5	0,25	2,00	8,5	0,645
7	halita	15	15	14,6	4,5	7,5	0,3	2,00	8,5	0,629
8	halita	15	15	14,9	4,6	7,45	0,25	0,14	15	0,0792
9	halita	15	15	14,8	4,4	7,6	0,2	0,14	15	0,0774
10	halita	15	15	15,05	4,4	7,6	0,2	0,14	15	0,0810
11	halita	14,5	15	14,8	4,4	7,6	0,2	0,02	15	0,01185
12	halita	15	15	14,8	4,15	7,85	0,2	0,02	15	0,01125
13	halita	15	14,9	14,9	4,6	7,3	0,2	0,02	15	0,01125
14	halita	15	14,7	14,85	4,7	7	0,25	0,02	15	0,01100
15	halita	15	15	15	4,5	7,5	0,25	0,02	15	0,01100



La primera probeta ensayada, Id0, presenta fisuras y defectos y rompe por un lugar inopinado. Pese a no obtenerse resultados experimentales válidos, el ensayo sirve para la puesta a punto y comprobación del equipo de ensayo. Se dan más detalles en el Anexo I.

Antes de acometer los ensayos con halita, se ha ensayado la única muestra disponible de silvinita (cloruro potásico) consistente en un cubo de 15 cm de arista, probeta Id1. El hecho de disponer tan solo de una muestra de silvinita responde a las dificultades para su obtención, como se ha explicado en el apartado 4.1.3.

A partir de los dos fragmentos resultantes de este ensayo se han tallado tres nuevas probetas de silvinita de tamaño más reducido, Id2 a Id4. De esta forma podemos añadir más resultados experimentales de fractura de esta litología sobre la que no hay información disponible.

Las probetas empleadas de halita, Id5 a Id15, han sido facilitadas directamente por la empresa explotadora del yacimiento de Cardona. El destino inicial de estas muestras era comercial y no ser ensayadas en un laboratorio, por lo que los cortes son un poco inexactos y algunas dimensiones difieren ligeramente de los valores nominales de 15 cm de arista.

Para estudiar la influencia de la velocidad de carga sobre la energía de fractura se han realizado tres conjuntos de ensayos WST a las distintas velocidades nominales indicadas en la Tabla 7.

Dentro de cada grupo de velocidad se han ensayado tres muestras para así poder tener una mínima representatividad estadística. Así pues la previsión inicial es emplear nueve muestras cúbicas de halita pero al final se han utilizado once, al repetirse dos ensayos a la velocidad más baja que presentaban roturas alejadas del plano esperado.

La elección de la velocidad mínima de los ensayos viene condicionadas por la velocidad mínima de subida del plato de la prensa empleada, que es de 0,02 mm/min. Para la velocidad máxima se elige un valor de dos órdenes de magnitud superior, o sea 2 mm/min, velocidad admitida por la prensa. El valor intermedio de velocidad escogido,

0,14 mm/min responde a que el log(COD) resultante queda situado a la mitad del valor de log(COD) máximo y mínimo.

Tabla 7. Velocidades nominales de los ensayos WST.

Velocidad nominal plato (mm/min)	Ángulo cuña (°)	Velocidad nominal COD (mm/min)
0,02	15°	0,011
0,14	15°	0,075
2,00	8,5°	0,60

La elección del ángulo de las cuñas está condicionada por el recorrido máximo del plato de la prensa y el tamaño de la muestra. La cuña de 8,5° permitiría imponer velocidades de COD más pequeñas pero tiene la desventaja de que requiere mayor recorrido vertical, estando éste limitado por la altura de muestra o el recorrido de la prensa dependiendo del caso considerado.

6.1.2 Ensayos de fluencia (*creep*)

Para la ejecución del ensayo se ha aplicado una compresión uniaxial constante a la muestra igual o menor de 1/2 respecto su resistencia a compresión simple. A partir de referencias bibliográficas [3], [8] e información facilitada por la empresa explotadora de la mina, se estima que la resistencia a compresión simple (UCS) de los litotipos estudiados es del orden de 25 MPa para la silvinita y 30 MPa para la halita.

La duración de los ensayos es de dos meses para el equipo con lecturas manuales mediante reloj-comparador y de una semana para el equipo con adquisición automática de lecturas. La menor duración del segundo grupo de ensayos se debe a la necesidad de dejar el equipo libre para otros grupos de investigación.

Se presenta en la Tabla 8 un resumen de las muestras empleadas.

Tabla 8. Muestras empleadas en ensayo de fluencia (*creep*)

Id	Duración (días)	Tensión aplicada (MPa)	Forma	Altura (cm)	Litología	Adquisición datos
CL1	184	10,1	Prismática 5x5 cm	9,65	halita+silvinita	Lectura manual con reloj comparador
CL2	161	9,59	Prismática 5x5,05 cm	8,0	silvinita	Lectura manual con reloj comparador
CL3	146	4,88	Prismática 5x5 cm	8,0	silvinita	Lectura manual con reloj comparador
C1	7	5	Cilíndrica Ø 5 cm	9,6	halita	Automática con LVDT + GeoLab
C2	7	10	Cilíndrica Ø 5 cm	9,92	halita	Automática con LVDT + GeoLab
C3	7	5	Cilíndrica Ø 5 cm	9,94	halita	Automática con LVDT + GeoLab
C4	7	10	Cilíndrica Ø 5 cm	10,4	halita	Automática con LVDT + GeoLab
C5	7	5	Cilíndrica Ø 5 cm	11,4	halita	Automática con LVDT + GeoLab
C6	7	10	Cilíndrica Ø 5 cm	12,3	halita	Automática con LVDT + GeoLab

En la Figura 83 se muestra los ensayos CL1 y CL2 en curso, con adquisición de datos manual mediante reloj comparador.

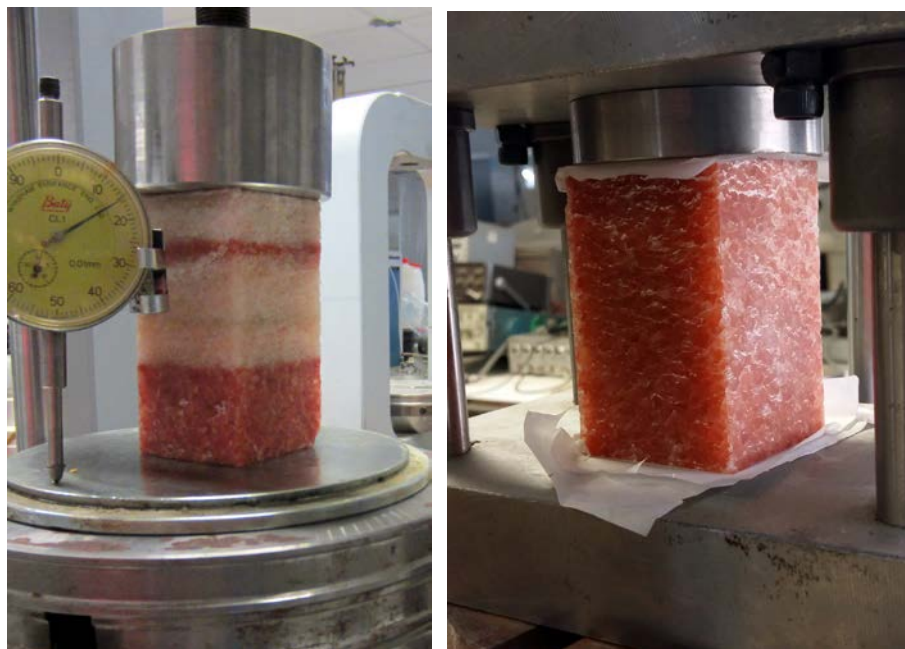


Figura 83. Muestra CL1 (izq.) formada por sal y silvinita. Muestra CL2 (dcha.) formada exclusivamente por silvinita.

6.1.3 Módulo elástico instantáneo

A pesar de que este parámetro está disponible en mucha bibliografía y estudios anteriores, se considera conveniente realizar un ensayo a compresión simple para contrastar valores.

A partir de recortes de la muestra de silvinita se ha tallado una probeta prismática de esbeltez aproximada 1:2, base de 5 x 5 cm y altura de 8 cm, Tabla 9. La prensa utilizada para este ensayo de compresión simple es la misma que la empleada para los ensayos WST. Se ha aplicado la carga a una velocidad de subida del plato de carga 3 mm/min.

Tabla 9. Muestra empleada en ensayo UCS para la determinación del módulo elástico instantáneo.

Id	Litología	Dimensiones base (cm)	Altura (cm)	Velocidad prensa (mm(min))
UCS2	silvinita	5 x 5	8	3

6.2 Ensayo WST

6.2.1 Halita

Los ensayos sobre este tipo de roca se han ejecutado sobre probetas cúbicas de 15 cm de arista, manteniendo en todos los casos la misma longitud de entalla (± 2 mm), por lo que son comparables tanto la máxima fuerza de splitting como la energía específica de fractura.

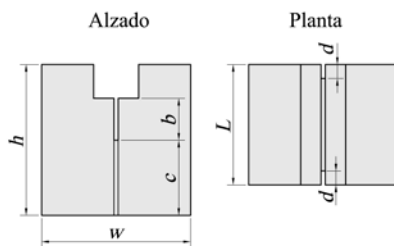
Para cada velocidad de COD aplicada se han ensayado como mínimo tres probetas. En los ensayos realizados a la velocidad más baja se han repetido dos de ellos por romper fuera del plano de fractura esperado. En este caso se ha continuado considerando válido el valor de máxima fuerza de splitting dado que ésta se produce poco después de que la

fractura comience a propagarse por lo que no es esperable una alteración significativa debido al desvío del camino de fractura.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Máxima fuerza de splitting y energía aparente de fractura de las probetas de halita

Id	Dimensiones (cm) (ver esquema al pie de tabla)						v. nominal prensa (mm/min)	ángulo cuñas (°)	v. COD (mm/min)	Max. F- splitting (kN/m)	Energía aparente de fractura (J/m ²)
	w	h	L	b	c	d					
5	15	15	15	4,3	7,7	0,3	2,00	8,5	0,640	25,84	567
6	15	15	14,9	4,5	7,5	0,25	2,00	8,5	0,645	18,7	592
7	15	15	14,6	4,5	7,5	0,3	2,00	8,5	0,629	25,93	891
8	15	15	14,9	4,6	7,45	0,25	0,14	15	0,0792	17,8	904
9	15	15	14,8	4,4	7,6	0,2	0,14	15	0,0774	20,4	731
10	15	15	15,05	4,4	7,6	0,2	0,14	15	0,0810	19,9	**
11	14,5	15	14,8	4,4	7,6	0,2	0,02	15	0,01185	16,9	**
12	15	15	14,8	4,15	7,85	0,2	0,02	15	0,01125	23,7	1102
13	15	14,9	14,9	4,6	7,3	0,2	0,02	15	0,01125	22,5	979
14	15	14,7	14,85	4,7	7	0,25	0,02	15	0,01100	12,74	**
15	15	15	15	4,5	7,5	0,25	0,02	15	0,01100	19,03	655



*Nota **: se descartan los resultados al producirse la fractura fuera del plano de corte.*

En la Figura 84 se presentan las curvas experimentales obtenidas *COD - fuerza splitting* para las probetas Id5 a Id15 de halita agrupadas según la velocidad de subida del plato de la prensa.

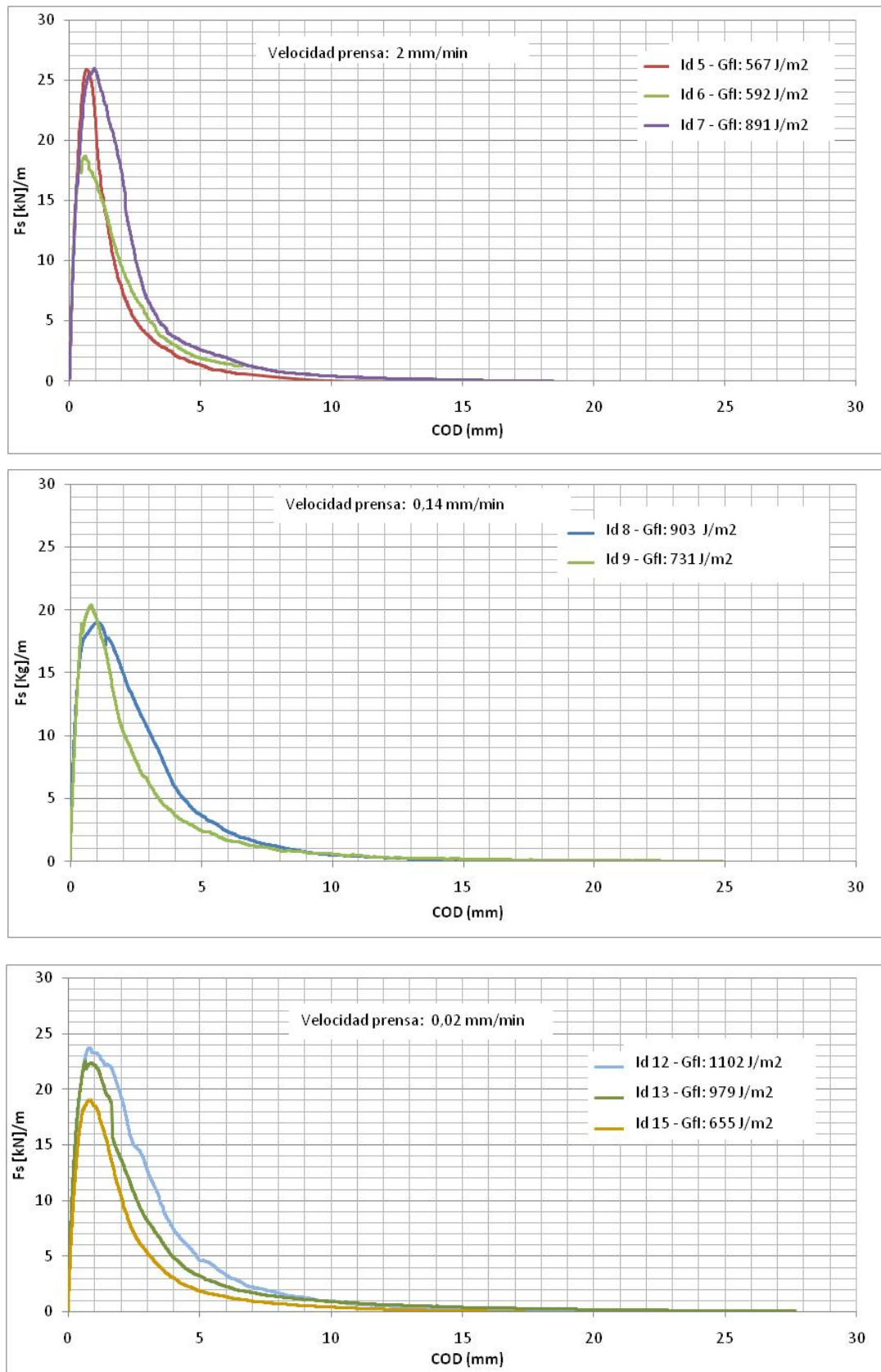


Figura 84. Resultados experimentales COD - F_s para la halita (Id5 a Id15) agrupados según la velocidad de subida de prensa (2, 014 y 0,02 mm/min).

Los valores promedio de energía aparente de fractura y fuerza máxima de splitting para cada conjunto de ensayos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Promedio de máxima fuerza de splitting y energía aparente de fractura de las probetas de halita.

dCOD/dt (mm/min)	Max. F-splitting (kN/m)			Energía aparente de fractura (J/m ²)		
	Min.	Max.	Promedio	Min	Max.	Promedio
0,64	18,70	25,93	23,49	567	891	683
0,08	17,79	20,39	19,35	731	904	817
0,01	12,74	23,72	18,98	655	1102	912

Se presenta en la Figura 85 los resultados de fuerza máxima de splitting de todos los ensayos realizados sobre probetas cubicas de sal, junto con el promedio para cada velocidad de ensayo y la recta de ajuste de los valores promediados.

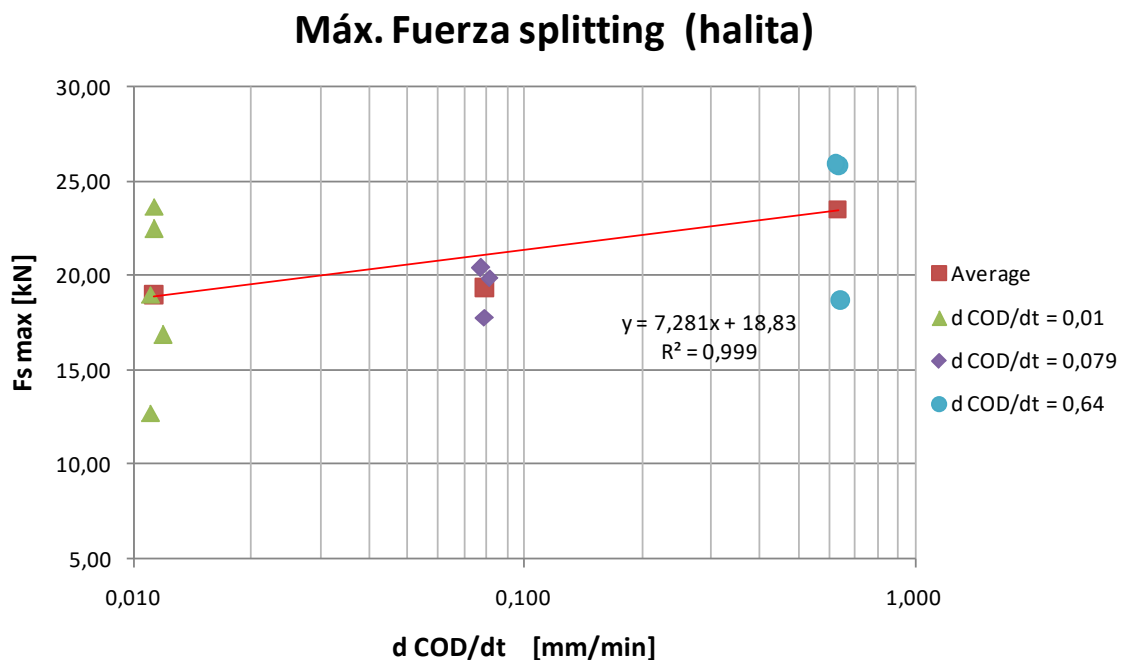


Figura 85. Máxima fuerza de splitting de las probetas de halita.

Como puede observarse la fuerza máxima de splitting parece aumentar con la velocidad de COD. La dispersión para cada conjunto de ensayos es alta, pero tomado el promedio

de cada grupo se puede ajustar muy bien una recta de regresión. El resultado es consistente con las observaciones experimentales hechas en ensayos de compresión simple en rocas: a mayor velocidad de carga mayor resistencia [33], [34].

Respecto la energía de específica aparente de fractura, (G_{fa}^I), con los ensayos WST lo que medimos es el trabajo necesario para fracturar probetas de unas dimensiones dadas. Ese trabajo es la suma del trabajo realizado para formar la fractura más el trabajo realizado para deformar viscosamente (fluencia) el material. Este trabajo total lo llamamos energía específica aparente de fractura, G_{fa}^I . No puede considerarse un parámetro en sí del material (halita o silvinita) sino de las probetas de halita o silvinita, dado que depende también del tamaño y geometría de las probetas. El COD determina el campo de deformaciones al interior de la probeta, pero no de manera proporcional debido a los fenómenos no lineales que estamos estudiando (fractura y fluencia).

Del litotipo halita se han descartado tres ensayos: Id10 e Id11 porque presentan roturas muy alejadas del plano esperado de fractura, e Id14 porque se observa cierta influencia del bandeado de la muestra, al romper paralelamente a estos planos, que posiblemente inducen un comportamiento anisotrópico. Ver fotos en el Anexo II.

Se presenta en la Figura 86 los resultados de la energía específica aparente de fractura de todos los ensayos realizados sobre probetas cubicas de sal, junto con el promedio para cada velocidad de ensayo y la recta de ajuste de los valores promediados.

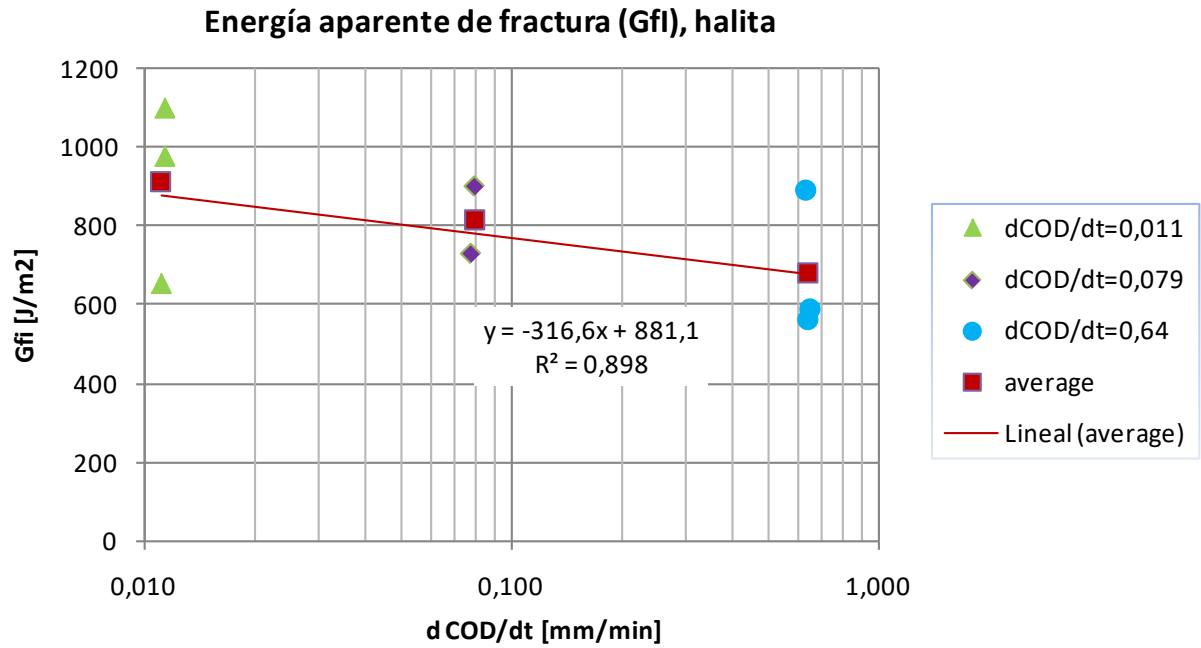


Figura 86. Energía aparente de fractura de las probetas de halita.

Como puede observarse la energía aparente de fractura parece disminuir con la velocidad de aplicación del COD. Se ha ajustado una recta de regresión al promedio de los valores de cada grupo de ensayos.

6.2.2 Silvinita

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

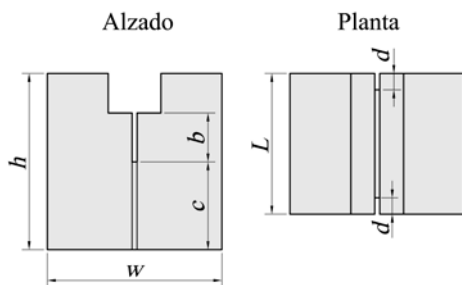
Los valores obtenidos de F_{sp} y G_{fa}^I de la muestra Id1 no son comparables con las otras tres porque la relación altura/longitud entalla de la probeta es diferente respecto las otras tres.

Las muestras Id2 a Id4 sí tienen idéntica relación altura/longitud entalla y, por lo tanto, los resultados son comparables.

Al disponer solo una muestra para cada velocidad de ensayo no se tiene certeza de la representatividad estadística de estos valores.

Tabla 12. Máxima fuerza de splitting y energía aparente de fractura de las probetas de silvinita

Id	Dimensiones (cm) (ver esquema al pie de tabla)						v. nominal prensa (mm/min)	ángulo cuñas (°)	v. COD (mm/min)	Max. F- splitting (kN/m)	Energía aparente de fractura (J/m ²)
	w	h	L	b	c	d					
1	14,9	15	15	6,2	5,8	0	0,02	8,5	0,006	15,58	218
2	15	11,5	7,2	2,5	6	0,475	0,20	8,5	0,06	21,80	156
3	15	11,75	6,5	2,5	6,25	0,5	0,07	8,5	0,021	27,37	138
4	15	11,5	5,4	2,5	6	0,3	0,02	8,5	0,006	17,50	223



En la Figura 87 se presentan las curvas experimentales obtenidas *COD - fuerza splitting* para las probetas Id1 a Id4 de silvinita, agrupadas según la geometría comparable de la probeta.

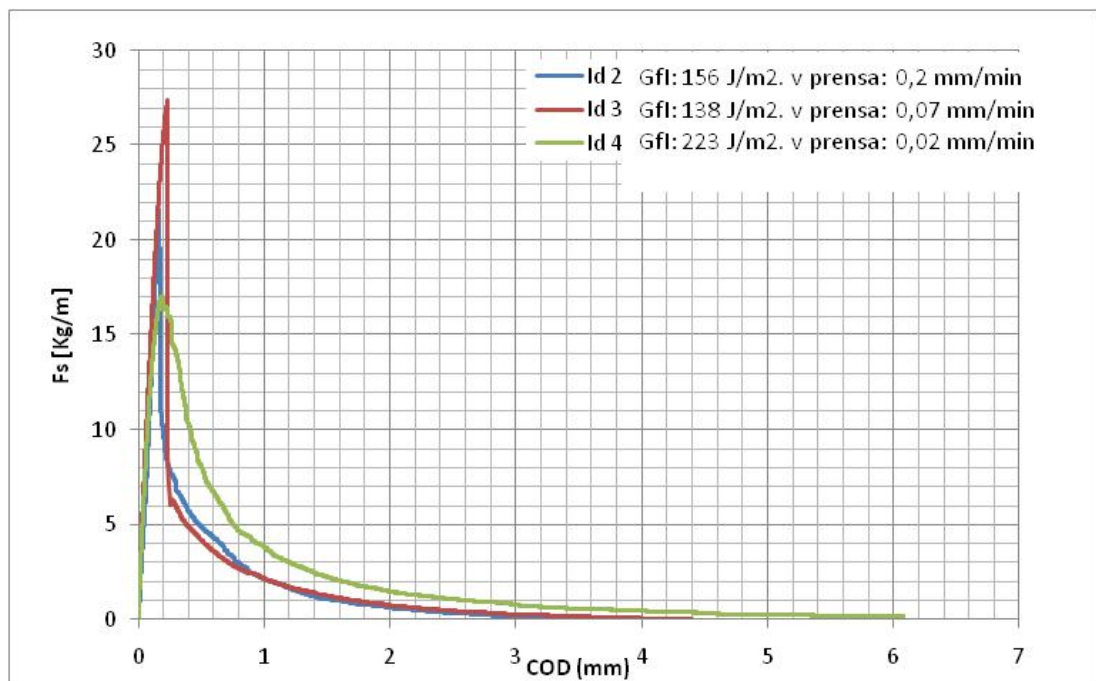
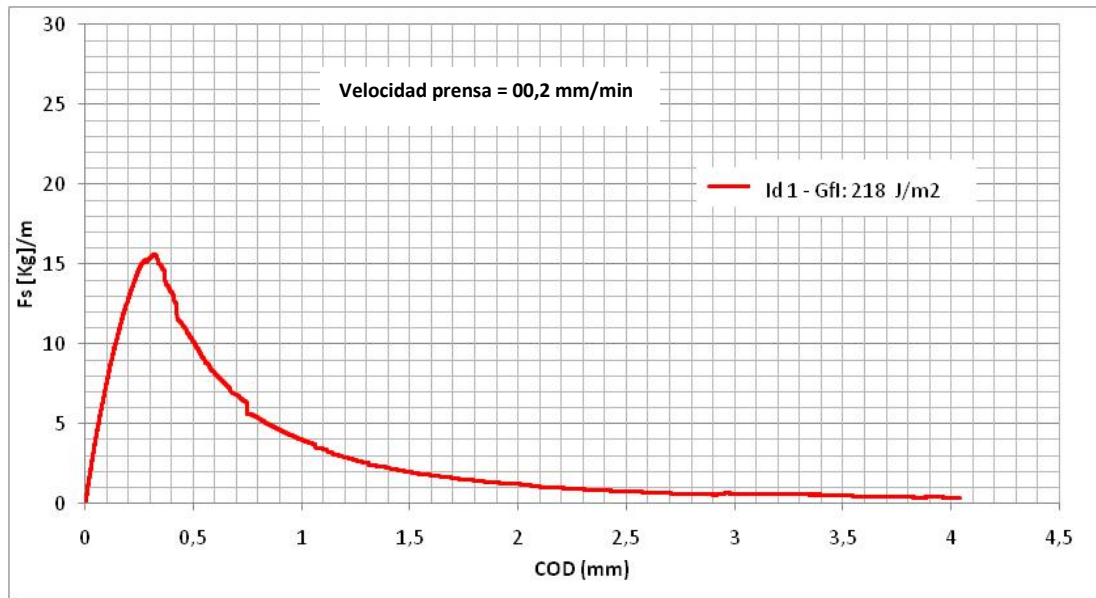


Figura 87. Resultados experimentales COD - F_s para la silvinita (Id1 a Id4) agrupados según la geometría comparable de la probeta.

En la Figura 88 se muestran los resultados comparables de las muestras Id2 a Id4.

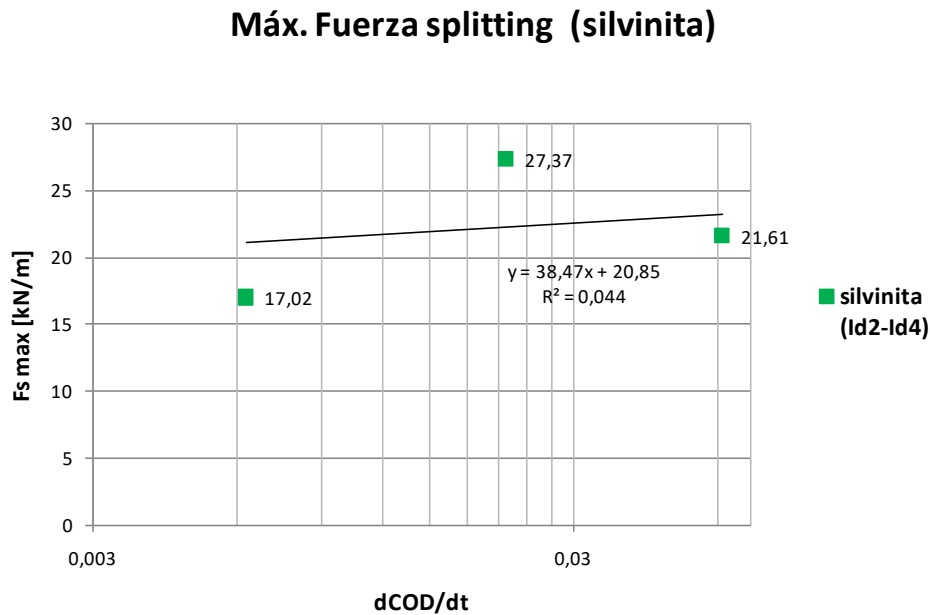


Figura 88. Máxima fuerza de splitting para las probetas de silvinita.

La tendencia que indican los resultados es que a mayor velocidad de COD aumenta la máxima fuerza de pico. La correlación es muy pobre y se deberían hacer más ensayos para dar más fiabilidad a la recta de regresión. Como ya se ha comentado, las dificultades de orden práctico que supone obtener muestras de silvinita han impedido seguir por esta línea. Este es un aspecto que debe mejorarse en el futuro si surge la posibilidad de obtener más especímenes.

Los resultados obtenidos para la silvinita no son comparables cuantitativamente con los obtenidos para la halita, al tener las probetas dimensiones diferentes. Sí son comparables cualitativamente ya que para ambos casos la tendencia general es que F_{sp} crece con la velocidad de COD.

Respecto la energía de específica aparente de fractura (G_{fa}^I), dado que el material de la probeta experimenta fluencia, esta energía de fractura solo es comparable entre las probetas Id2 – Id4, que tienen la misma geometría.

Los ensayos Id2 e Id3 presentan una respuesta inestable en el comportamiento post-pico, con una caída brusca de la fuerza en la curva $P_H - COD$ probablemente causado por la aparición de un snap-back debida a la escasa rigidez del sistema de la máquina de ensayo respecto la rigidez de la muestra. En ambos casos la energía de fractura está calculada como el área resultante bajo la curva fuerza-desplazamiento, por lo que el valor resultante debe considerarse como una cota superior del que se obtendría en un WST estable.

En la Figura 89 se muestran los resultados obtenidos de energía aparente de fractura con las muestras de silvinita 2, 3 y 4.

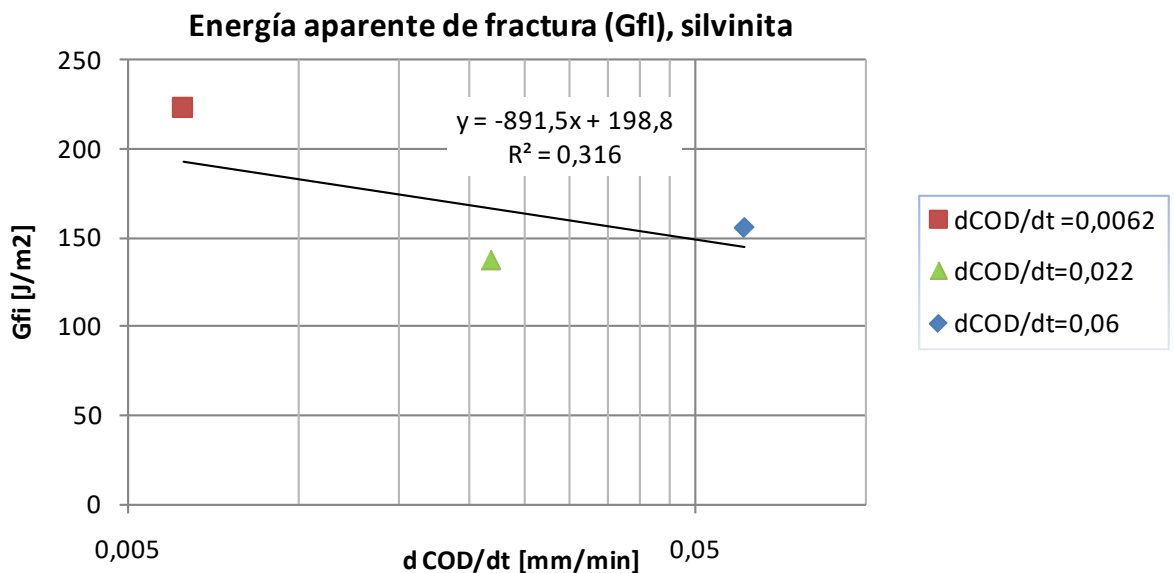


Figura 89. Energía aparente de fractura de las probetas de silvinita.

La línea de tendencia muestra como al aumentar la velocidad de aplicación de desplazamiento, la energía aparente de fractura parece disminuir.

6.3 Ensayos de fluencia (*creep*)

6.3.1 Deformación elástica instantánea:

En un ensayo de fluencia convencionalmente se distinguen dos tipos de deformaciones:

- la deformación elástica instantánea en el momento de aplicar la carga.
- la deformación diferida en el tiempo, o deformación por fluencia.

En un ensayo de fluencia la aplicación de la carga se puede considerar instantánea, si las deformaciones que ocurren por fluencia durante el tiempo requerido para aplicar la carga son despreciables. Por otro lado, la velocidad de aplicación de la carga tiene que ser lo suficientemente baja como para que los efectos dinámicos también sean despreciables. En el caso de las rocas salinas, dado su marcado comportamiento reológico, probablemente no sea posible cumplir con estas dos condiciones.

Para calcular la deformación inicial que sufre la probeta y ajustar todas las curvas de fluencia al mismo punto de partida se supone un módulo elástico instantáneo $E_0 = 1,4$ GPa, similar al obtenido del ensayo de compresión simple realizado y que además es consistente con los ofrecidos en otras fuentes de información, como Campos de Orellana [8] e informes internos de las empresas explotadoras a los que el autor ha tenido acceso.

6.3.2 Halita

En la Figura 90 se han representado la deformación axial obtenida aplicando una tensión constante de 5 y 10 MPa durante siete días. Todas las probetas son de sal, cilíndricas de aproximadamente 50 mm de diámetro. El inicio de cada curva de fluencia se ha llevado a un tiempo inicial de 10 segundos (en el que queda aplicada totalmente la carga constante) y una deformación inicial calculada con la tensión aplicada y el módulo elástico considerado (1,4 GPa). Como puede observarse después de la aplicación de la carga, la velocidad de deformación va disminuyendo en el tiempo, acercándonos a un estado de fluencia estacionaria (secundaria).

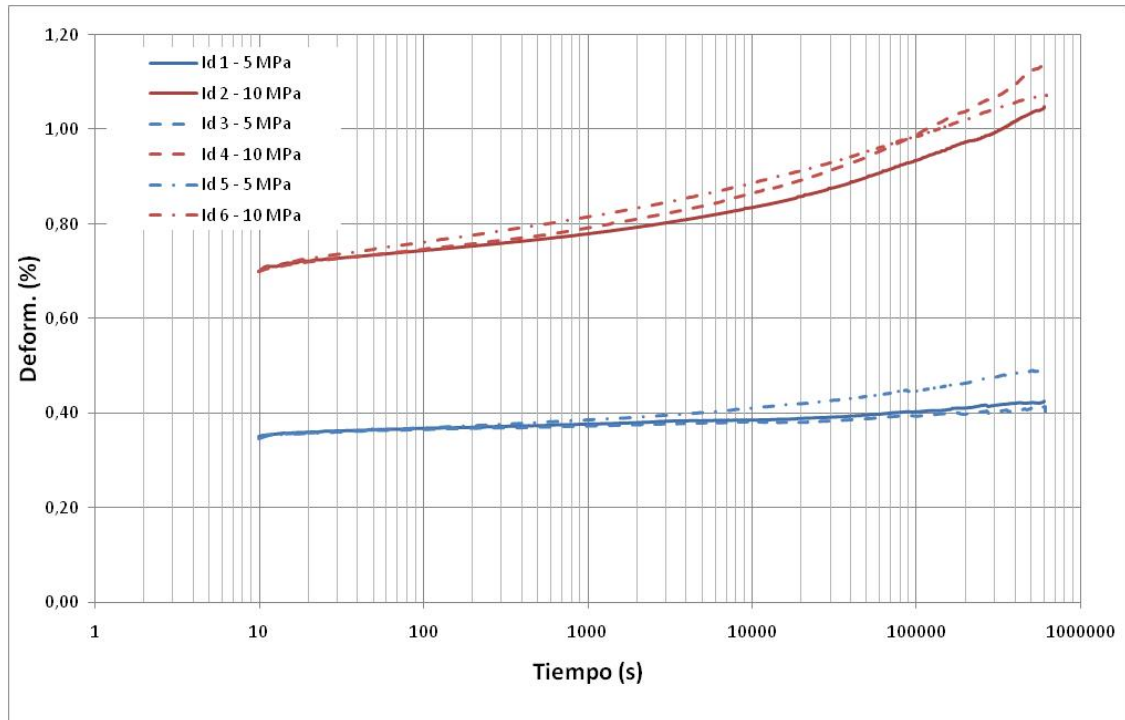


Figura 90. Curvas de fluencia para testigos de halita de 50 mm diam.

Para obtener las constantes de fluencia, se han representado los pares de valores de deformación de fluencia (ε_c) versus logaritmo tiempo (t) obtenidos del ensayo y se ha ajustado una curva tipo exponencial al tramo de fluencia secundaria, ver sección 4.2.1.

Los parámetros ajustados y los coeficientes de correlación se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores ajustados de los parámetros de la ecuación potencial de fluencia secundaria. Halita.

Muestra	Tensión uniaxial (MPa)	E_0 (MPa)	K [$\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-n}$]	B [s^{-n}] ($K \times \sigma$)	n	R^2
C1	5	1.400	0,067686	0,33843	0,01528	0,938
C2	10	1.400	0,060237	0,60237	0,03812	0,940
C3	5	1.400	0,068441	0,342207	0,01189	0,884
C4	10	1.400	0,057265	0,57265	0,04649	0,923
C5	5	1.400	0,062114	0,31057	0,03195	0,968
C6	10	1.400	0,062202	0,62202	0,0398	0,990

A partir de la ley potencial es posible calcular los módulos elásticos de los muelles y las viscosidades de los amortiguadores que componen un modelo viscoelástico de cadena de Maxwell, tal como se explica en la sección 4.2.

6.3.3 Silvinita

En la Figura 91 se muestra la deformación axial obtenida aplicando una tensión constante de aproximadamente 5 y 10 MPa en banco edométrico. Las probetas CL2 y CL3 son prismáticas compuestas en su totalidad por silvinita. La probeta CL1 está formada por una alternancia de sal y potasa. Esto puede explicar la menor deformación diferida que ofrece CL1 respecto CL2. Estos tres ensayos han tenido una duración de doce semanas y la adquisición de datos ha sido manual mediante la lectura de un reloj-comparador

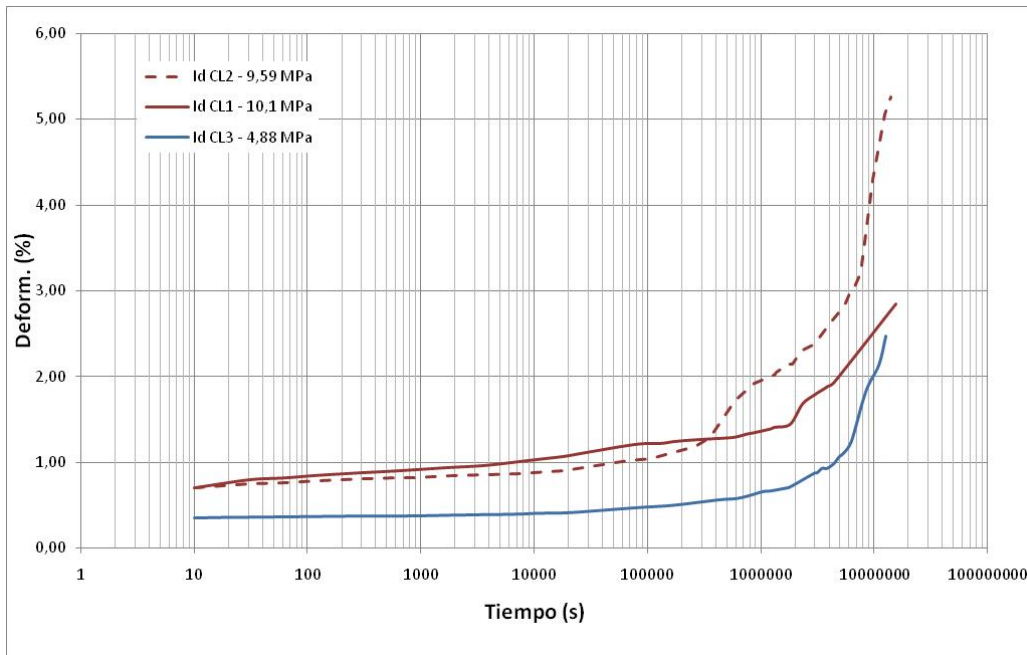


Figura 91. Curvas de fluencia de muestras prismáticas de silvinita (CL2 y CL3) y halita-potasa (CL1) (adquisición manual de lecturas)

Tabla 14. Valores ajustados de los parámetros de la ecuación potencial de fluencia secundaria.
Silvinita

Muestra	Tensión uniaxial (MPa)	E_0 (MPa)	K [MPa ⁻¹ .s ⁿ]	B [s ⁻ⁿ] ($K \times \sigma$)	n	R^2
CL1	10,1	1.400	0,00065792	0,006645	0,065580	0,875
CL2	9,59	1.400	0,00103733	0,009948	0,008400	0,800
CL3	4,88	1.400	0,00863115	0,042120	0,072909	0,696

6.4 Ensayo de compresión simple

Para este ensayo se ha utilizado la misma prensa con control de desplazamiento empleada en los ensayos WST.

La velocidad nominal de subida de plato de prensa para este ensayo ha sido de 3 mm/s

La gráfica tensión-deformación se presenta en la Figura 92, en la que puede observarse una primera etapa de asiento de la muestra, correspondiente al primer tramo de la curva, que va aumentando progresivamente de pendiente. Después de ello se entra en un tramo lineal de máxima pendiente, que es la que se ha adoptado como representativa del módulo inicial. Cuando se alcanza aproximadamente un 50% de la resistencia máxima se pierde la linealidad, produciéndose una disminución de rigidez. Los resultados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resistencia a compresión simple

<i>Muestra</i>	<i>Velocidad nominal plato (mm/s)</i>	<i>Módulo tangente E_0 (MPa)</i>	<i>Resist. compresión simple, UCS (MPa)</i>
UCS1	3	1.372	17,3

Los valores obtenidos están en consonancia con los ofrecidos por [3], [8] o en estudios internos de las empresas explotadoras a los que el autor ha tenido acceso.

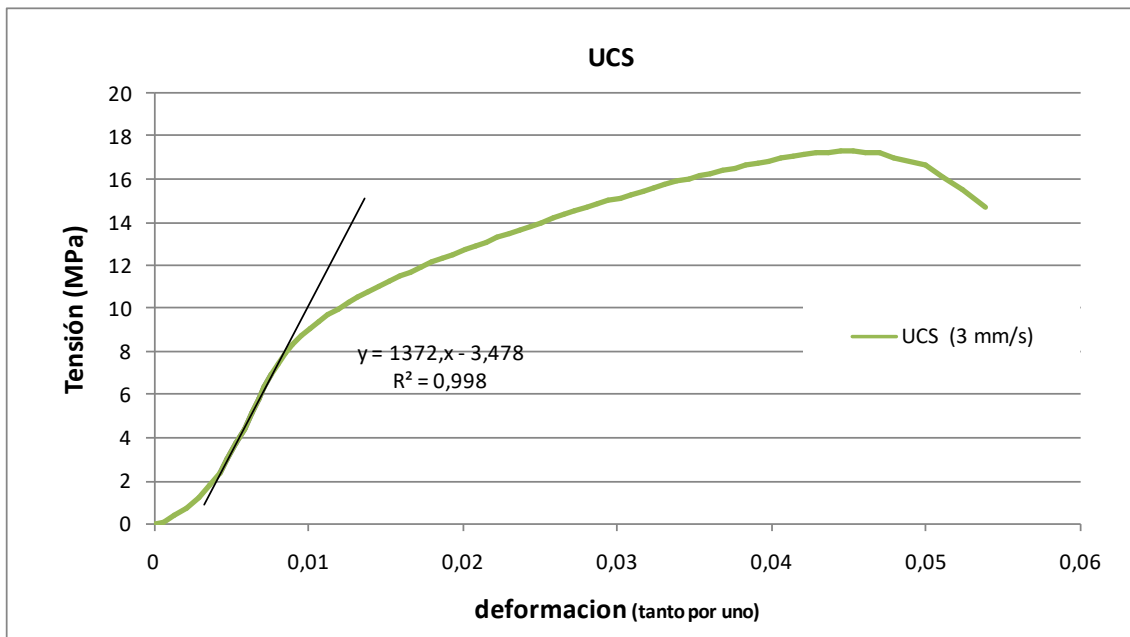


Figura 92. Curva tensión-deformación para obtención del módulo elástico tangente.

En la Figura 93 se muestra la rotura de la probeta UCS1 en el ensayo realizado.

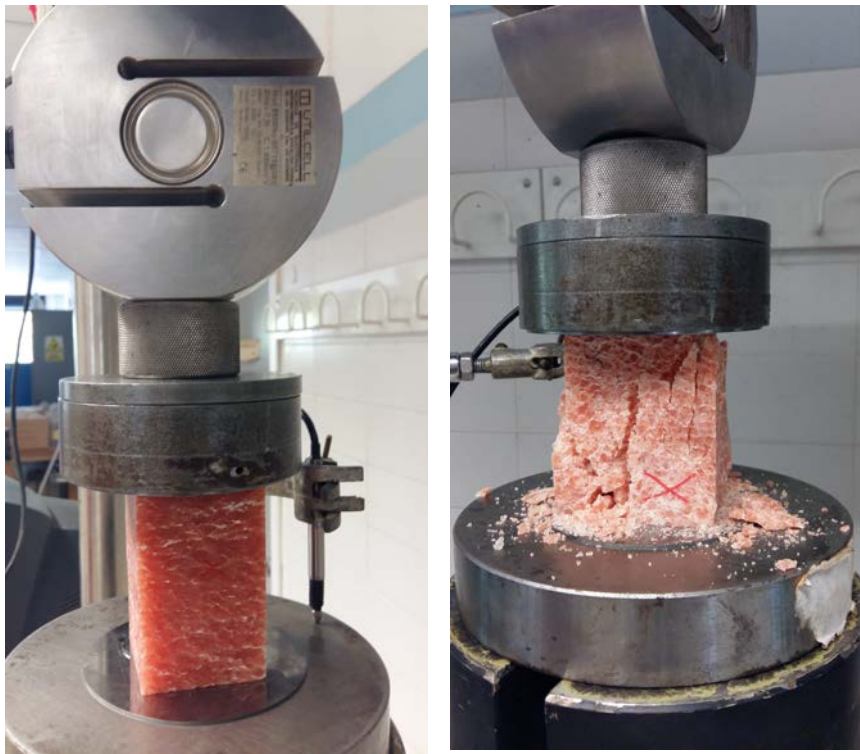


Figura 93. Ensayo de compresión simple (UCS1).

6.5 Discusión e interpretación de resultados.

6.5.1 WST

En primer lugar haremos una discusión sobre cómo serían cualitativamente los resultados de unos ensayos ideales realizados a distintas velocidades de COD sobre unas muestras perfectas, continuas, homogéneas, isótropas e idénticas entre sí de un material visco-elástico.

La Figura 94 representa esquemáticamente la respuesta idealizada de tres ensayos realizados a diferentes velocidades de COD sobre un mismo material que presenta fluencia. Si consideremos la curva 1 correspondiente a un ensayo realizado a la mayor velocidad posible, casi instantánea, pese a que el material posee fluencia su respuesta sería equivalente a la de un material que no la tuviera, dado que en un lapso de tiempo muy corto, casi nulo, solo se pueden apreciar deformaciones elásticas instantáneas, sin tiempo a que se desarrollen deformaciones significativas por fluencia. En este caso al comenzar a aplicar el COD el material se comportaría como si fuese linealmente elástico, aumentando la fuerza de splitting proporcionalmente con el COD (tramo O-A, curva 1, Figura 94). A partir del punto A la respuesta deja de ser lineal debido a que en la punta de la entalla se ha alcanzado la resistencia a tracción del material y empieza a fracturarse. La fuerza aun sigue creciendo hasta alcanzar el máximo en el punto B señalado en la curva. A partir de ese punto se inicia la rama de descenso correspondiente a la propagación de fractura que eventualmente partirá la probeta en dos. El trabajo realizado sobre la probeta es el área bajo la curva.

Si ahora repetimos el mismo ensayo disminuyendo la velocidad de COD (curva 2, Figura 94), la curva se inicia con menor pendiente, y la parte lineal del primer tramo de la rama de ascenso se reduce. Este hecho se debe a que al aumentar el tiempo en que se aplican progresivamente las tensiones en el cuerpo de la probeta, las deformaciones por fluencia se vuelven significativas. Ahora ya no puede establecerse nítidamente el punto de inicio de la fractura con pérdida de linealidad.

La curva 3 (Figura 94) se corresponde a un ensayo realizado aun a menor velocidad. En este caso las deformaciones diferidas se ponen aun más de manifiesto, lo que se traduce en una menor pendiente de la rama de ascenso OB'', tanto menor cuanto más lento sea

el ensayo. Igual que antes, también observaremos que el pico de fuerza máxima B'' va disminuyendo y se produce con un COD más elevado. Este hecho está en consonancia con observaciones empíricas realizadas en las que la resistencia aparente a compresión simple disminuye al reducir la velocidad del ensayo, [9].

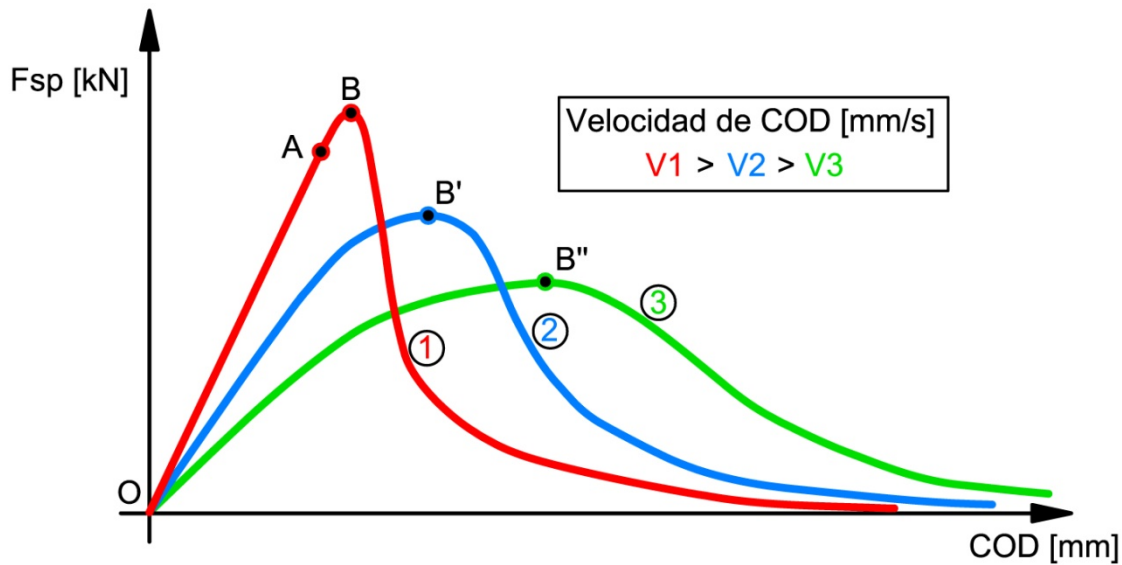


Figura 94. Respuesta idealizada de ensayos WST a diferentes velocidades para un mismo material viscoelástico.

Respecto al trabajo de fractura dada por el área bajo la curva F-COD, observaremos que a menor velocidad de COD aumenta el trabajo necesario para fracturar la probeta, debido a que la menor velocidad comporta que el material visco elástico tenga más tiempo para experimentar relajación de tensiones. Esta relajación provoca que para alcanzar el estadio tensional necesario para la formación y progreso de la fractura, se precise aplicar mayor COD, tanto más cuanto más relajación se produzca. Este aumento de COD se traduce en mayor trabajo. Por todo ello el área bajo la curva 1 se corresponde únicamente a trabajo de fractura, mientras que el área bajo las curvas 2 y 3 corresponde a trabajo de fractura más el trabajo de fluencia.

Los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo son consistentes con el razonamiento expuesto. Para ambos litotipos (halita y silvinita), la fuerza de pico disminuye y la energía específica aparente de fractura aumenta cuando disminuimos la velocidad de aplicación de COD.

Respecto la pendiente inicial de la rama de ascenso en función de la velocidad de COD, se observa la tendencia de que a mayor velocidad (0,64 mm/min) tienen mayor pendiente que los ensayos a menor velocidad. Los ensayos más lentos (0,011 mm/min) son los que presentan más dispersión: En la Figura 95 se representan el inicio de las ramas de ascenso hasta un COD de 0,30 mm. Puede observarse que la no linealidad de la rama ascendente se inicia antes para menores velocidades de carga.

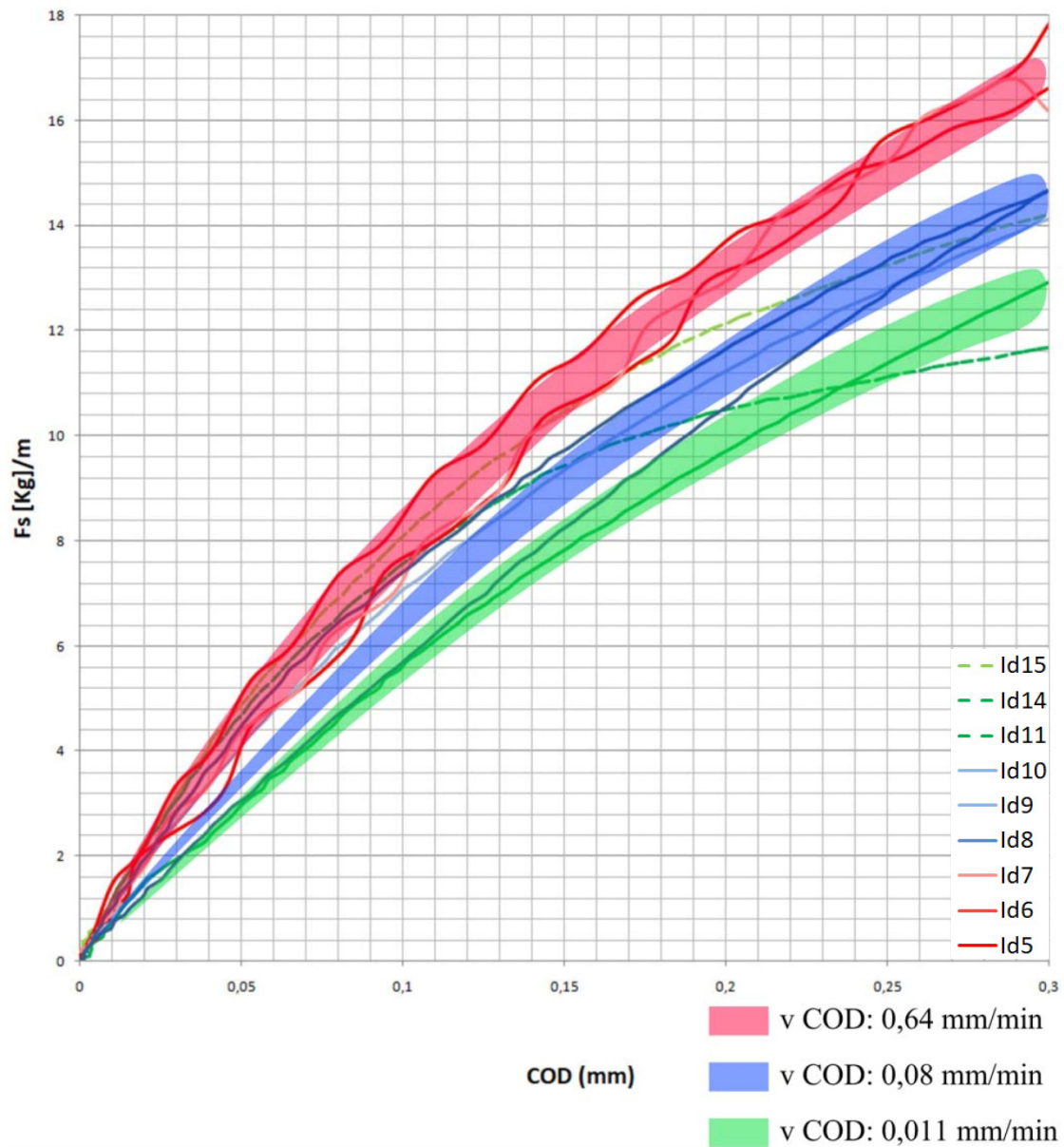


Figura 95. Ensayos WST. Pendiente inicial de la rama de ascenso con un COD entre 0 y 0,3 mm. Las franjas coloreadas marcan las tendencias de pendiente para cada grupo de ensayos.

6.5.2 Posibles causas de dispersiones de resultados

Para que una muestra pueda considerarse como un medio “continuo”, el tamaño de las heterogeneidades, bordes de grano e imperfecciones ha de ser pequeño en relación con las medidas de la probeta [30]. Esta relación entre tamaño de muestra/tamaño de heterogeneidades influirá en la dispersión de resultados. Si por ejemplo realizamos ensayos de resistencia sobre especímenes con una relación de tamaños tal que puedan considerarse como homogéneos o continuos, la dispersión de los resultados obtenidos será menor. Por este motivo el tamaño de las probetas empleadas en ensayos de rocas y hormigones es mayor que las empleadas en el estudio de metales y aleaciones, con un tamaño de grano mucho más reducido [10].

En el caso que nos ocupa podemos observar a simple vista tres “defectos” de fabricación o heterogeneidades en las muestras, Figura 96:

- 1- Bordes de granos (de 1 mm a 20 a 30 mm)
- 2- Planos de exfoliación de la red cristalina, formando 90° entre ellos (de pocos mm, extendiéndose hasta 30 a 40 mm)
- 3- Presencia de impurezas arcillosas, en bandas más o menos paralelas entre sí, de varios centímetros de longitud.

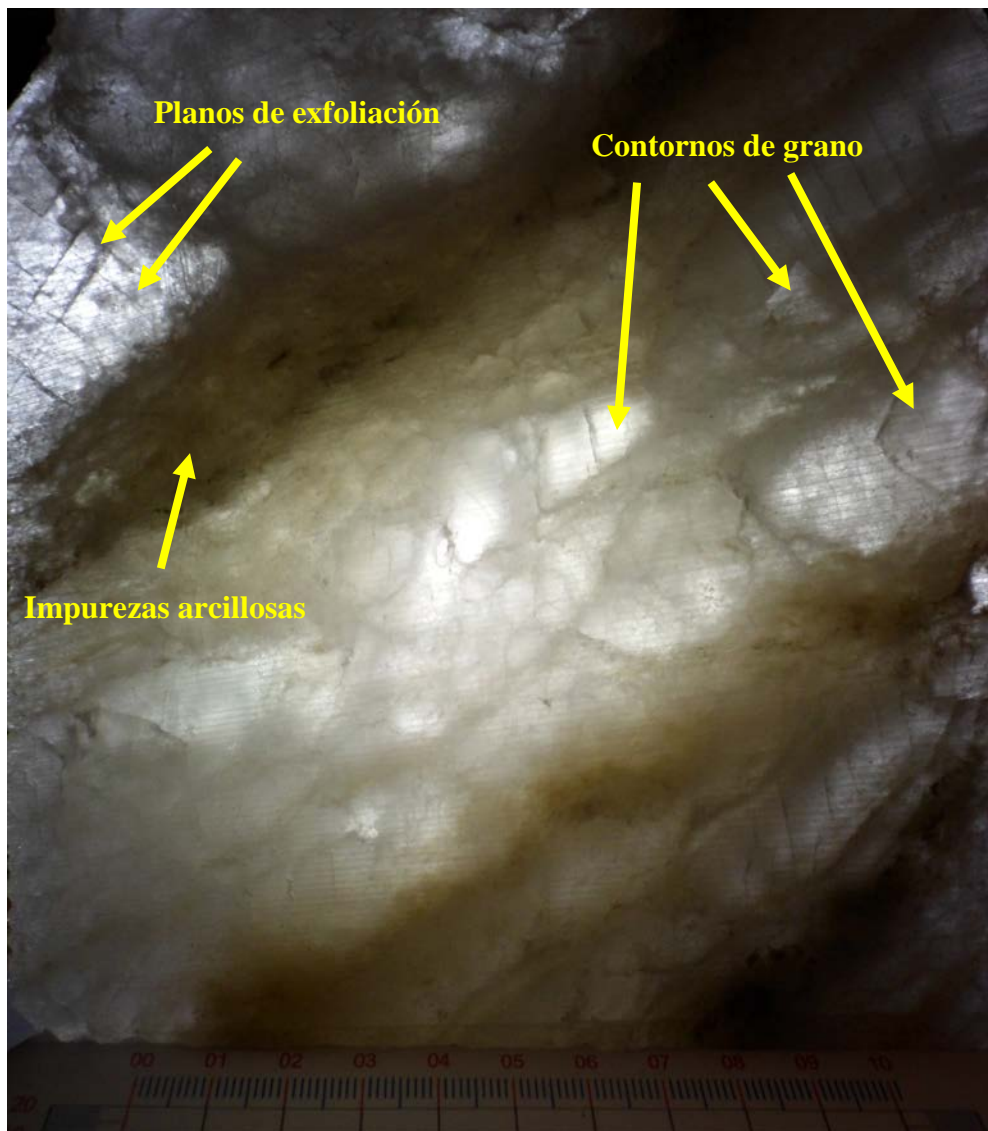


Figura 96. Heterogeneidades presentes en las muestras

Todas las heterogeneidades descritas son de gran tamaño relativo respecto las muestras empleadas, cúbicas de 15 cm de arista (Figura 97), lo que afecta a su homogeneidad y continuidad. Esta sea posiblemente una causa de la gran dispersión observada en los resultados de los ensayos que se presentan

Para intentar disminuir esta dispersión se deberían utilizar muestras de mayor tamaño, con las dificultades de extracción y ejecución de los ensayos que ello implica.

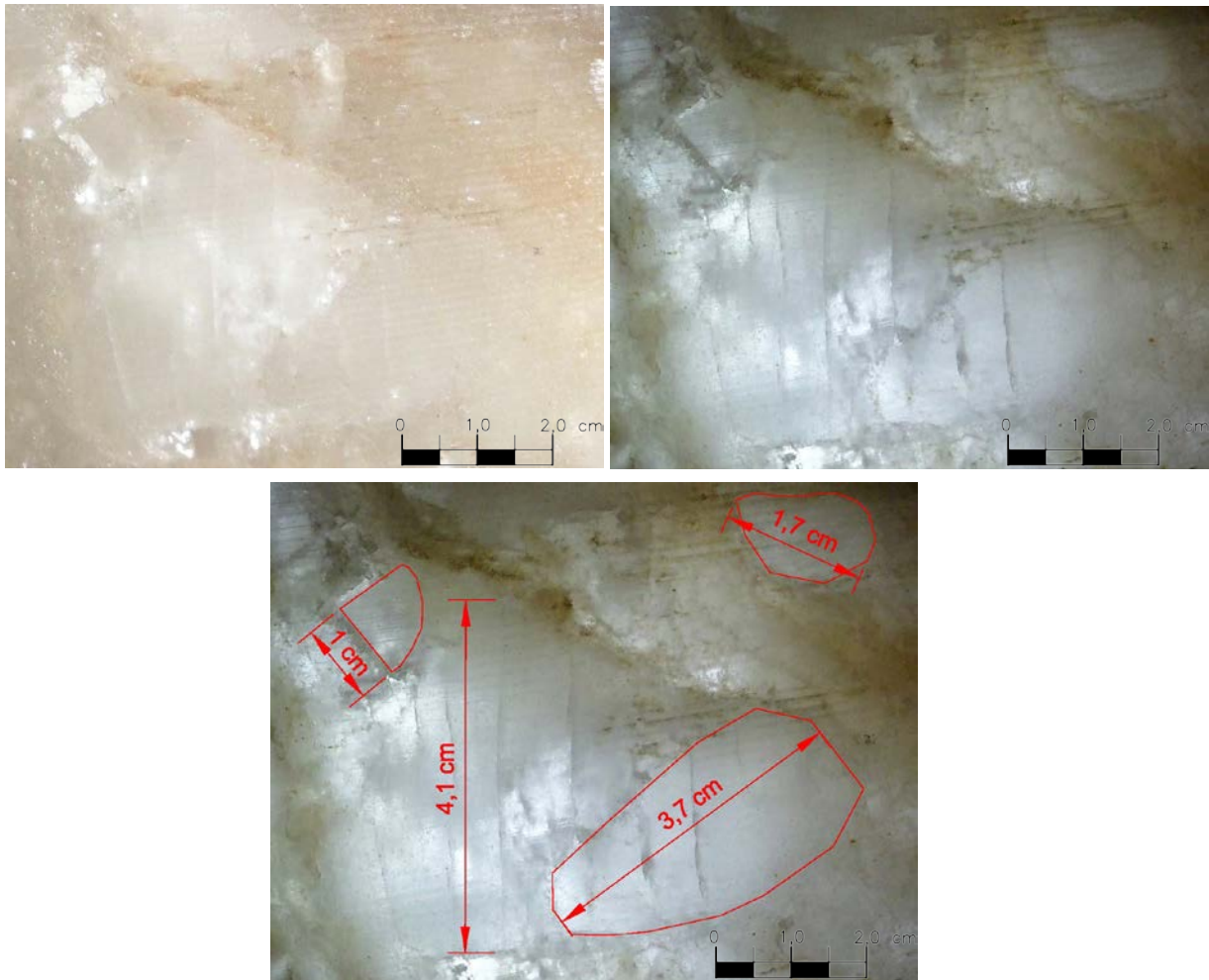


Figura 97. Dimensiones de granos y planos de exfoliación. Tienen gran tamaño respecto las muestras cúbicas empleadas de 15 cm. de arista.

Otra alternativa sería la extracción de muestras de la conocida “sal entredós” que tiene un tamaño de grano más pequeño. Para este trabajo no se ha tenido acceso a la citada capa.

6.5.3 Ensayos de fluencia.

Si comparamos las curvas de fluencia de silvinita y halita en los siete primeros días del ensayo, Figura 98, podemos observar como la silvinita muestra una mayor fluencia respecto la halita. Esto está en consonancia con las observaciones empíricas transmitidas por la empresa que muestran como las galerías excavadas en silvinita tienen mayores convergencias que las excavadas en halita.

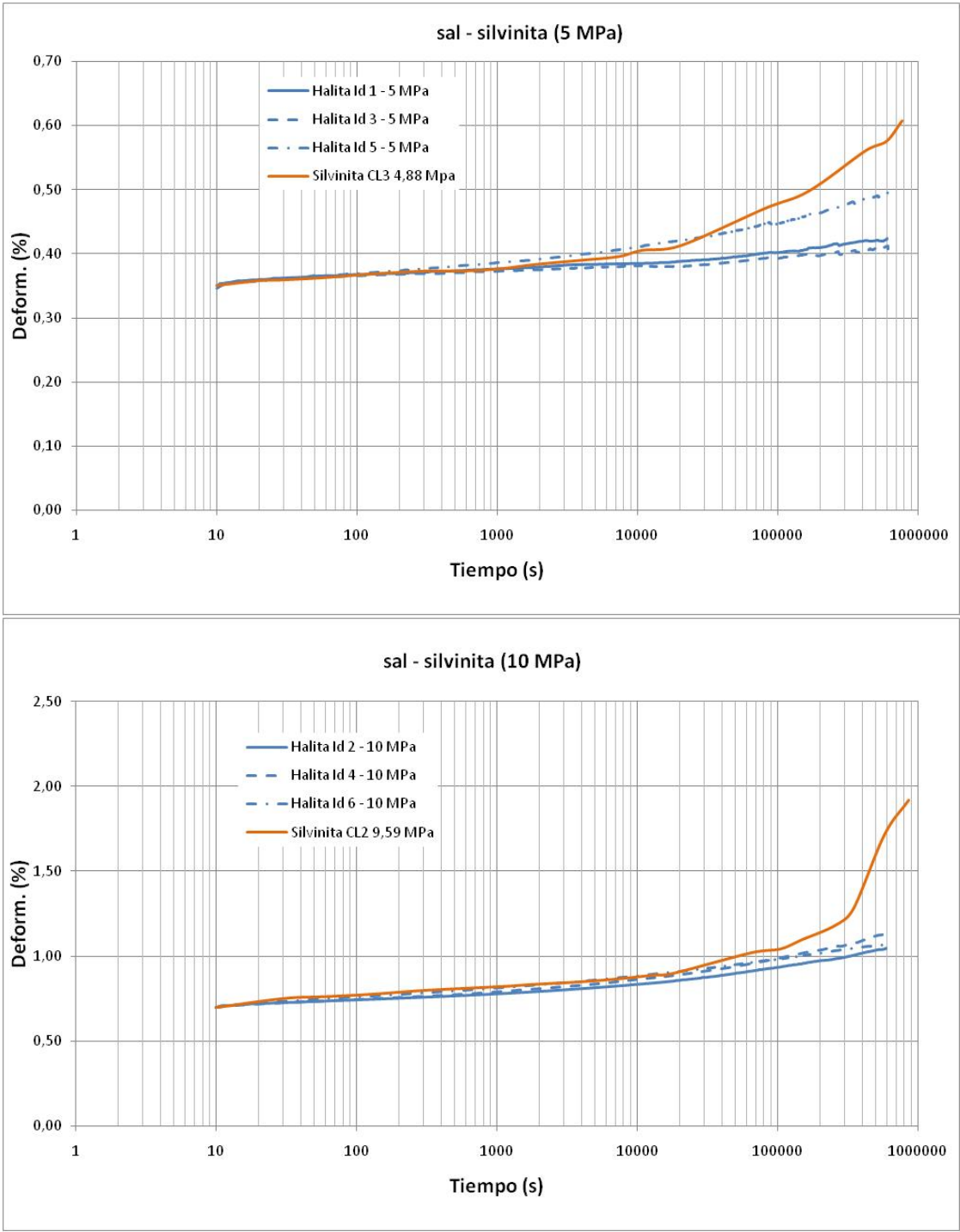


Figura 98. Comparativas entre curvas de fluencia de la halita respecto la silvinita

7 Conclusiones

El ensayo Wedge Splitting Test (WST) permite estudiar el desarrollo de fracturas en materiales cuasi-frágiles de forma controlada para distintas velocidades de abertura. Esta variación de la velocidad de ensayo permite estudiar la relación entre los fenómenos de fluencia y el trabajo necesario para crear fracturas al poner de manifiesto cómo cambian estos parámetros en función de la velocidad aplicada.

Los resultados de los ensayos WST realizados para este TFM con rocas salinas muestran que cuanto más baja es la velocidad de abertura impuesta mayor es el trabajo necesario para fracturar la roca.

Este hecho es debido a que la menor velocidad comporta que un material de marcado comportamiento visco elástico como la sal tenga más tiempo durante el ensayo para experimentar relajación de tensiones. Esta relajación provoca que para alcanzar el estadio tensional necesario para la formación y progreso de la fractura, se precise aplicar mayor COD, tanto más cuanto más relajación se produzca. Este aumento de COD se traduce en mayor trabajo, que se consume en parte como trabajo de fractura y en parte como trabajo de fluencia.

Respecto la fuerza máxima de splitting, ésta parece aumentar con la velocidad de aplicación del COD. El resultado es consistente con las observaciones experimentales hechas en ensayos de compresión simple en rocas: a mayor velocidad de carga mayor resistencia.

Analizando las curvas fuerza-COD observamos como aumenta la pendiente de la rama inicial a medida que sube la velocidad de COD, indicativo que a mayor velocidad del ensayo se produce menos fluencia. También se observa la no linealidad desde un nivel inferior de tensiones.

Una aportación inédita de este trabajo es obtener valores experimentales de energía específica de fractura en Modo I para la halita así como su variación respecto a la velocidad de abertura impuesta. No se ha localizado ningún estudio ni publicación previa que contenga ensayos WST sobre rocas salinas.

Sobre la silvinita no se pueden extraer conclusiones dado los pocos datos experimentales disponibles. Una futura continuación de este trabajo sería aumentar el número de ensayos realizados sobre este litotipo para dar validez estadística a los resultados aquí obtenidos. Para ello se deberían extraer nuevas muestras con alguno de los métodos ya ensayados en este trabajo u otros más perfeccionados, siempre considerando que las condiciones ambientales y las limitaciones de acceso dificultarán la obtención de nuevas muestras.

Una forma de intentar disminuir la dispersión de los resultados sería utilizar probetas de mayor tamaño en las que relación entre las medidas de los granos e imperfecciones y el tamaño de la muestra sea menor. Dadas las dificultades de obtención y ensayo que ello representaría, una alternativa puede ser obtener muestras de la capa conocida como “sal entredós” que presenta un menor tamaño de grano. Para este trabajo no se ha tenido acceso a la citada capa.

Otra posible mejora de este trabajo es ampliar el rango de velocidades de los ensayos, sobre todo por el extremo inferior dado que es el de mayor interés para el estudio del comportamiento de galerías a escala temporal de meses o años. Para ello habría que realizar modificaciones de calado en la prensa actual que quedan fuera del alcance del presente TFM.

Finalmente apuntar que una posible futura ampliación de este trabajo es reproducir numéricamente los ensayos realizados. Para ello debe tenerse en cuenta que el modelo numérico empleado actualmente solo incorpora visco-elasticidad en el continuo pero no en la junta que representa la zona de fractura. En la probeta real, sobre la zona de fractura, sometida a esfuerzos de tracción y compresión también actúan los fenómenos de fluencia y relajación. Sin embargo, este hecho no queda reflejado en el modelo numérico actual dado que los elementos junta utilizados obedecen a una ley constitutiva (LC) independiente del tiempo (elasto-plástica) y por tanto sus tensiones no sufren fenómenos de relajación, con independencia de la duración del ensayo. Ello se traduce en que el modelo numérico “consume” menos tensión en fenómenos de fluencia y por tanto su comportamiento visco-elástico es menos acusado que en la realidad. Por tanto una clara posible línea de investigación futura consistiría en desarrollar un modelo

constitutivo de junta que, además de los principios de la mecánica de fractura, también incorporase la dependencia del tiempo (visco-elasticidad).

8 Referencias

- [1] Liaudat, J., Garolera Vinent, D., Martínez Benasat, A., Carol, I., Lakshmikhanta, R., & Alvarelllos, J. (2015). Numerical modelling of the Wedge Splitting Test in rock specimens, using fracture-based zero-thickness interface elements. In *COMPLAS XIII: proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity: fundamentals and applications* (pp. 974-981). CIMNE.
- [2] Liaudat, J., Garolera Vinent, D., Martínez Estévez, A., Carol, I., Lakshmikantha, R. M., & Alvarelllos Iglesias, J. (2017). Avoiding fracture instability in wedge splitting tests by means of numerical simulations. In *Computational Plasticity XIV: Fundamentals and Applications: proceedings of the XIV International Conference on Computational Plasticity: Fundamentals and Applications, held in Barcelona, Spain 5-7 September 2017* (pp. 514-521).
- [3] Jeremic, M. L. (1994). *Rock mechanics in salt mining*: AA Balkema. Rotterdam, The Netherlands.
- [4] Senseny, P. E., Hansen, F. D., Russell, J. E., Carter, N. L., & Handin, J. W. (1992). Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 29, No. 4, pp. 363-378). Pergamon.
- [5] Berest, P., & Brouard, B. (1998). A tentative classification of salts according to their creep properties. *Proceedings of Solution Mining Research Institute SMRI Spring Meeting, New Orleans, USA; April 19-22, 1998*, (pp 18-30).
- [6] Hambley, D. F., Dusseault, M. B., & Mraz, D. Z. (1988). Characterization of saltrock creep behavior. In: *Proc., 29th U.S. Symp., University of Minnesota, Minneapolis*, (pp 179-189).
- [7] Olivella, S., Gens, A., Alonso, E. E., & Carrera, J. (1998). Analysis of creep deformation of galleries backfilled with porous salt aggregates. *Mechanical Behaviour of Salt IV. Trans Tech Publications*. (pp 269–284).
- [8] de Orellana, A. C. (1996, June). Pressure solution creep and non-associated plasticity in the mechanical behavior of potash mine openings. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Vol. 33, No. 4. (pp. 347-370). Pergamon.
- [9] Cristescu, N. (1989). *Rock rheology*. Kluwer Academic Publishers
- [10] Silberschmidt, V. G., & Silberschmidt, V. V. (2000). Analysis of cracking in rock salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33(1), 53-70.
- [11] Chan, K. S., Munson, D. E., Bodner, S. R., & Fossum, A. F. (1996). Cleavage and creep fracture of rock salt. *Acta Materialia*, 44(9), 3553-3565.

- [12] Rummel, F., Klee, G., & Weber, U. (1996). Hydraulic vs pneumatic fracturing for in situ stress determination in rock salt. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 32, No. 4 (pp. 337-342).
- [13] López, C. M., Carol, I., & Murcia, J. (2001). Mesostructural modeling of basic creep at various stress levels. In: *Ulm, Bazant, Wittmann, editors. Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle materials. (Concreep6), Cambridge, USA;* (pp 101-106).
- [14] Prat, P. C., Gens, A., Carol, I., Ledesma, A., & Gili, J. A. (1993). DRAC: A computer software for the analysis of rock mechanics problems. *Application of computer methods in rock mechanics. Shaanxi Science and Technology Press, Xian, China, 1361-1368.*
- [15] Barnes, Howard A., John Fletcher Hutton, and Kenneth Walters (1989). *An introduction to rheology*. Elsevier,
- [16] Dusseault, M. B., and C. J. Fordham. (1993) "Time dependent behaviour of rocks, comprehensive rock engineering: Principles, practice and projects.", 119-149.
- [17] Anderson, Ted L. (2005). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press.
- [18] Maestro, E., Oms, O., Biosca, J. *La montaña de sal de Cardona y el valle del Cardener*. <http://www.geo-camp.net/es/geo/la-montana-de-sal-de-cardona-y-el-valle-del-cardener/?print=pdf> (acceso enero 2019)
- [19] Rubio Navas, J. (1997). Inventario nacional de recursos minerales de cloruro sódico y sales potásicas. *Madrid: Insituto Tecnológico Geominero de España*.
- [20] Urai, J. L., & Spiers, C. J. (2007, May). The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation. In: *The Mechanical Behaviour of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt (eds Wallner M, Lux KH, Minkley W, Hardy HR Jr)*. (pp. 149–158). Taylor & Francis Group, London.
- [21] Spiers, C. J., Urai, J. L., Lister, G. S., Boland, J. N., & Zwart, H. J. (1986). *The influence of fluid-rock interaction on the rheology of salt rock* (No. EUR--10399). Commission of the European Communities.
- [22] Spiers, C. J., Schutjens, P. M. T. M., Brzesowsky, R. H., Peach, C. J., Liezenberg, J. L., & Zwart, H. J. (1990). Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1), 215-227.

- [23] Olivella, S., & Gens, A. (2002). A constitutive model for crushed salt. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 26(7), 719-746.
- [24] Spiers, C. J., Peach, C. J., Brzesowsky, R. H., Schutjens, P. M. T. M., Liezenberg, J. L., & Zwart, H. J. (1988). *Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks* (No. EUR--11848). Commission of the European Communities.
- [25] Hunsche, U. (1994). Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock: experimental technique and interpretation. In: Critescu NS, editor, *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials* (pp. 1-53). Springer-Verlag, Vienna.
- [26] Singh, A., Kumar, C., Kannan, L. G., Rao, K. S., & Ayothiraman, R. (2018). Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107, 243-248.
- [27] Mellegard, K. D., Robert, L. A., & Callahan, G. D. (2012). Effect of sylvite content on mechanical properties of potash. *Mechanical Behavior of Salt VII-Berest, Ghoreychi, Hadj-Hassen and Tijani*, (pp. 71-79). Taylor and Francis Group.
- [28] Gamboa, E., & Atrens, A. (2003). Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts. *Engineering Failure Analysis*, 10(5), 521-558.
- [29] Gamboa, E., & Atrens, A. (2005). Material influence on the stress corrosion cracking of rock bolts. *Engineering Failure Analysis*, 12(2), 201-235.
- [30] Ingraffea, A. R. (1987). Theory of crack initiation and propagation in rock. In: Atkinson, B.K., (Ed.), *Fracture Mechanics of Rocks*, Academic Press, San Diego, California. (pp. 71-108).
- [31] Brühwiler, E., & Wittmann, F. H. (1990). The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1-3), 117-125.
- [32] Löfgren, I., Olesen, J. F., & Flansbjer, M. (2004). *Application of WST-method for fracture testing of fibre-reinforced concrete*. Chalmers University of Technology.
- [33] Kimberley, J., Ramesh, K. T., & Daphalapurkar, N. P. (2013). A scaling law for the dynamic strength of brittle solids. *Acta Materialia*, 61(9), 3509-3521.
- [34] Alam, M. S., Chakraborty, T., Matsagar, V., Rao, K. S., Sharma, P., & Singh, M. (2015). Characterization of Kota Sandstone under different strain rates in uniaxial loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(1), 143-152.

- [35] ISRM Testing Commission. (1988). Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 25(2), 71-96.
- [36] Carol, I., Prat, P. C., & Lopez, C. M. (1997). Normal/shear cracking model: application to discrete crack analysis. *Journal of engineering mechanics*, 123(8), 765-773.
- [37] Bazant, Z. P. (1982). Input of creep and shrinkage characteristics for a structural analysis program. *Matériaux et Construction*, 15(4), 283-290.
- [38] Carol, Ignacio, Carlos M. López, and Olga Roa. "Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 52.1-2 (2001): 193-215.

9 Anexo I. Ensayos preliminares

Para poner a punto la metodología del ensayo y adquirir experiencia en el empleo del equipo se ha realizado un primer ensayo con un cubo de 10 cm de arista, de carnalita, que presenta defectos y grietas, (Figura 99), y que por tanto no ofrece garantía en los resultados que pueda ofrecer. Se elige la velocidad más baja de subida de plato: 0,02 mm/min.

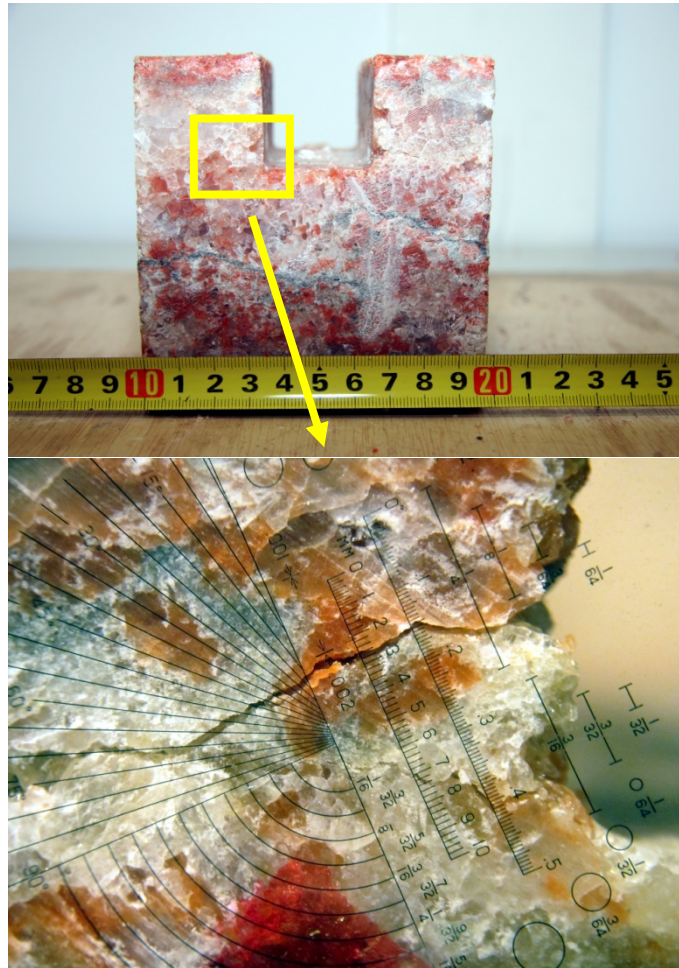


Figura 99. Muestra de carnalita agrietada empleada para un ensayo previo de ajuste del equipo.

En el intento de obtener algún resultado aprovechable de esta muestra, se han colocado unos refuerzos de acero zincado en la zona de grieta y en el lateral, adheridos mediante resina epoxi. A pesar de ello a las pocas horas del inicio del ensayo la fisura preexistente se ha propagado, fallando totalmente el ensayo al romper fuera del plano de rotura, Figura 100.

De todas maneras este primer ensayo de tanteo ha servido para calibrar y comprobar el correcto funcionamiento de la celda de carga y de los transductores LVDT, ajuste de frecuencia de adquisición de datos, ajuste de la altura del marco de reacción, etc.

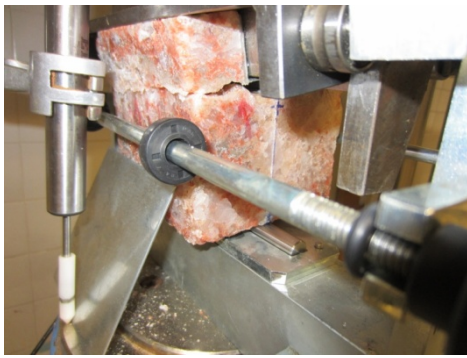


Figura 100. Ensayo fallido preliminar.

10 Anexo II. Ensayos WST descartados

Se han descartado los resultados de energía de fractura de varios ensayos al presentar superficies de rotura alejadas del plano preestablecido y por tanto ofrecer dudas sobre su validez.

Los ensayos descartados son:

La Id 10, que presenta una superficie muy irregular y alejada del plano de corte preestablecido, Figura 101

La Id 11, Figura 102 y la Id 14, Figura 103 rompen a favor de un bandeo que presentan las muestras, mostrando cierta anisotropía,

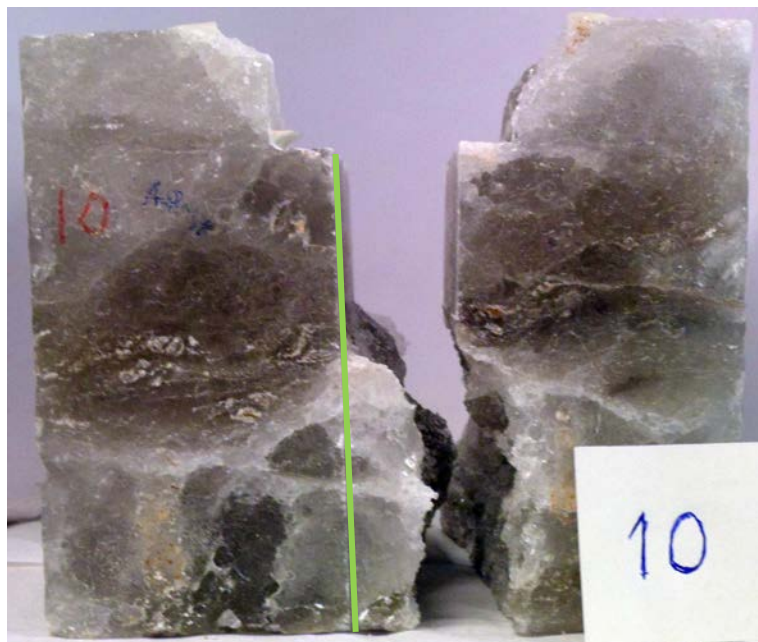


Figura 101. Plano de fractura de Id 10. La línea verde representa el plano preestablecido de rotura



Figura 102. Plano de fractura de Id 11. La línea verde representa el plano preestablecido de rotura

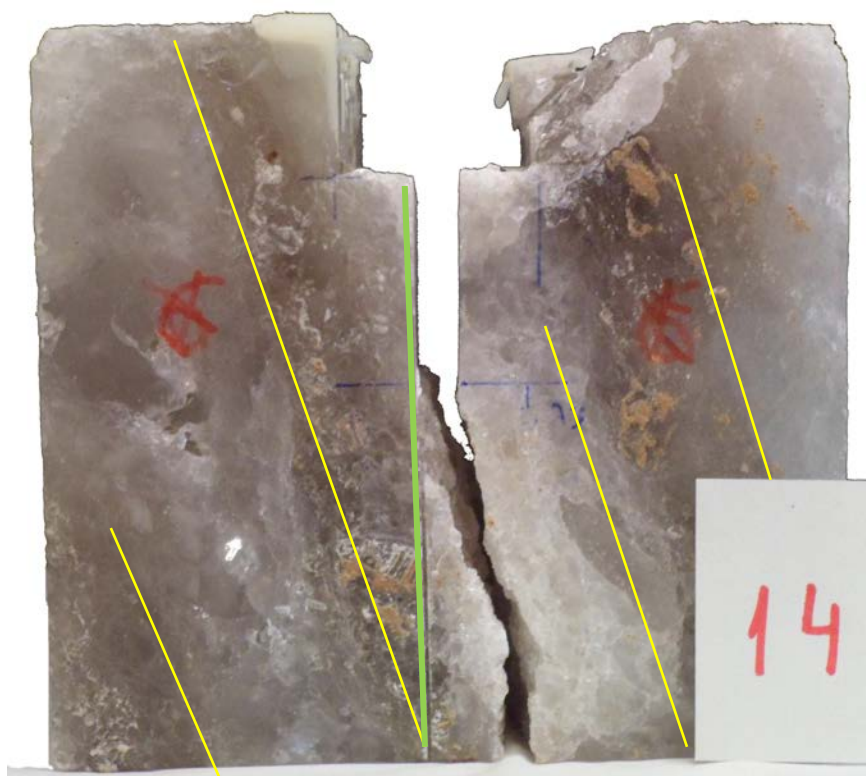
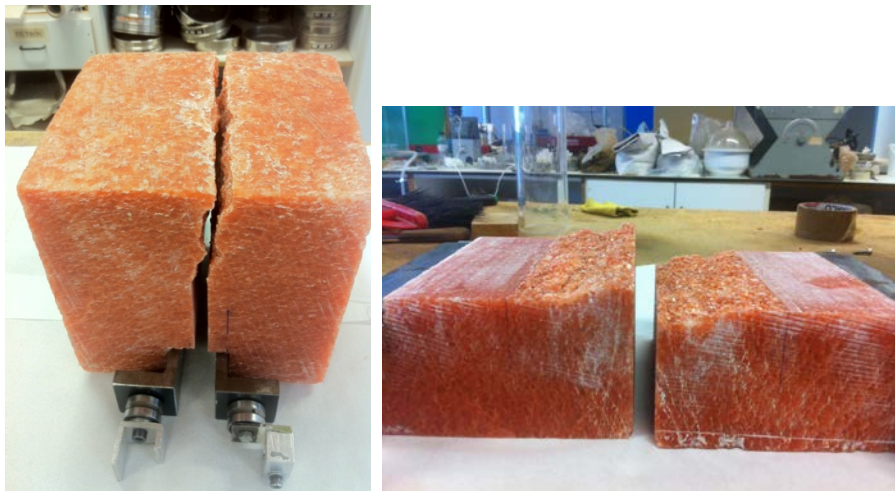


Figura 103. Plano de fractura de Id 14. Muestra tendencia a alinearse con el bandeo.

11 Anexo III. Fotografías de los ensayos WST

Id 1



Id2



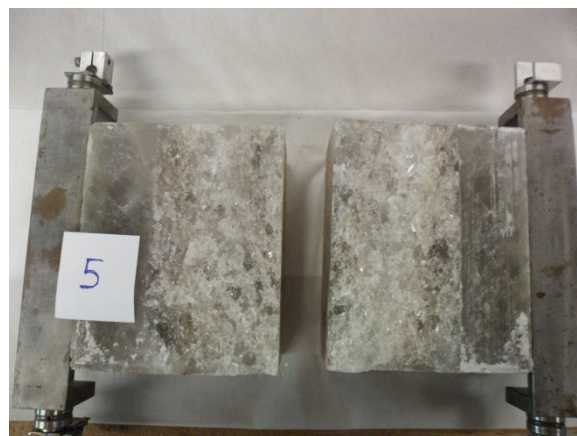
Id3



Id4



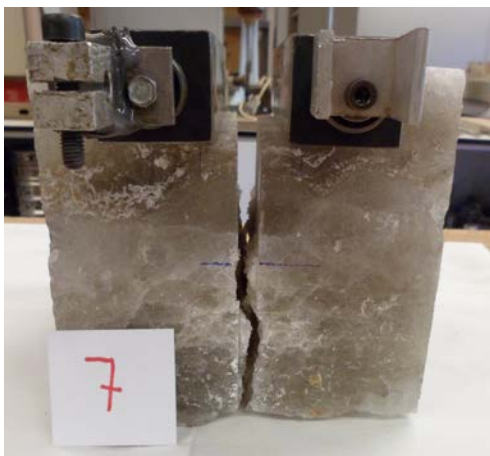
Id5



Id 6



Id7



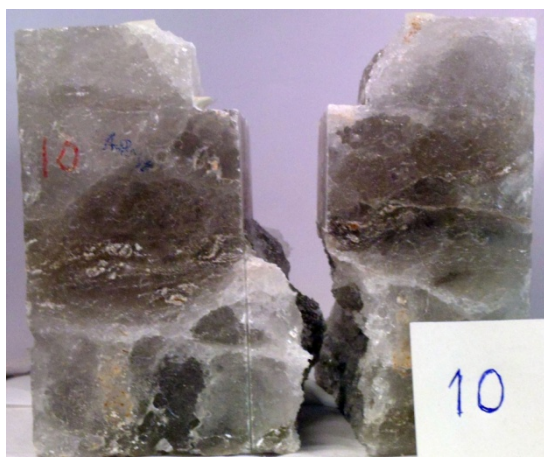
Id8



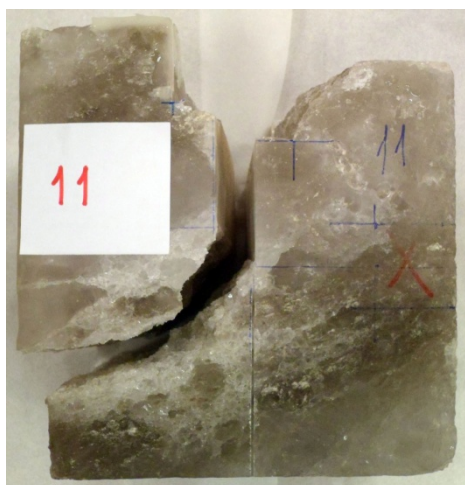
Id9



Id10



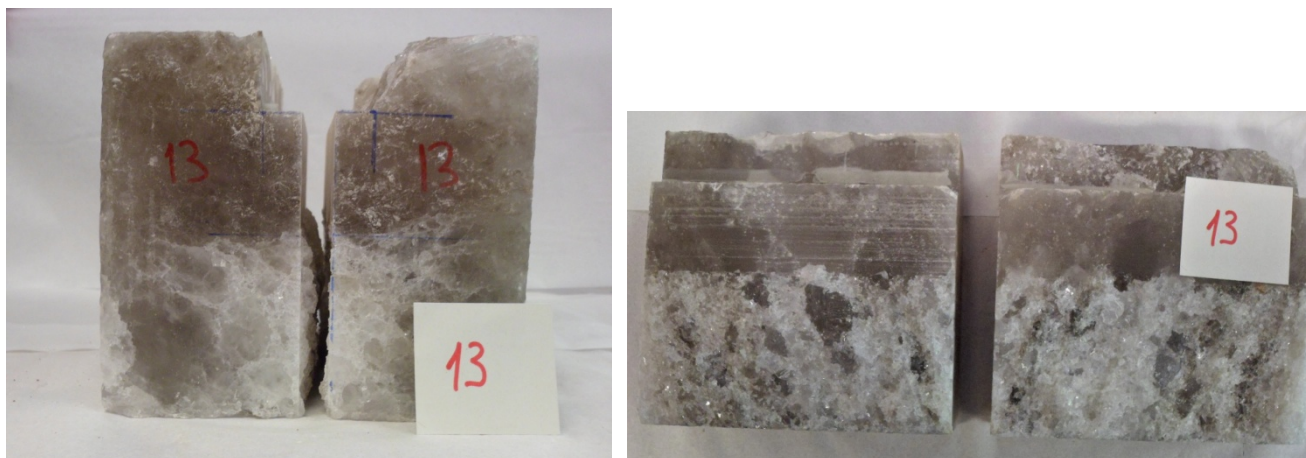
Id11



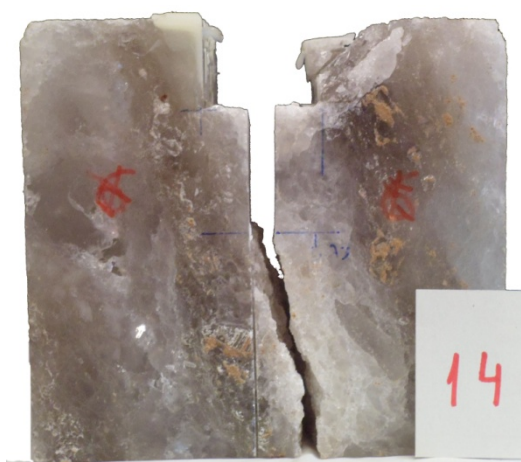
Id12



Id13



Id14



Id15

